

IMPLEMENTACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)
PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS PARA MEJORAR LAS MEZCLAS
ASFÁLTICAS Y GARANTIZAR PAVIMENTOS SOSTENIBLES EN BOGOTÁ

CÉSAR MAURICIO DIAZ CLAROS
LILIANA CAROLINA CASTRO CELIS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2017

IMPLEMENTACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)
PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS PARA MEJORAR LAS MEZCLAS
ASFÁLTICAS Y GARANTIZAR PAVIMENTOS SOSTENIBLES EN BOGOTÁ

CÉSAR MAURICIO DÍAZ CLAROS
LILIANA CAROLINA CASTRO CELIS

MONOGRAFÍA DE GRADO PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2017

CONTENIDO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Resumen..... | 8 |
| 2 | Abstract..... | 9 |
| 3 | Introducción..... | 10 |
| 4 | Objetivos | 11 |
| 4.1 | General | 11 |
| 4.2 | Específicos..... | 11 |
| 5 | Planteamiento del Problema | 12 |
| 6 | Justificación..... | 14 |
| 7 | Marco Teórico | 17 |
| 7.1 | Asfaltos | 17 |
| 7.1.1 | Propiedades físicas | 17 |
| 7.1.2 | Composición Química..... | 18 |
| 7.1.3 | Clasificación de los asfaltos:..... | 20 |
| 7.2 | Pavimento | 21 |
| 7.3 | Grano de Caucho Reciclado (GCR)..... | 21 |
| 7.3.1 | Composición de las llantas | 21 |
| 7.4 | Procesos de Obtención del Grano de Caucho Reciclado | 25 |
| 7.4.1 | Proceso Ambiental..... | 25 |
| 7.4.2 | Proceso criogénico | 26 |

| | | |
|-------|---|----|
| 7.4.3 | Otros procesos | 28 |
| 7.5 | Consideraciones y definiciones internacionales para la implementación del GCR en las mezclas asfálticas | 28 |
| 7.6 | Métodos de adición de GCR en las mezclas asfálticas..... | 29 |
| 7.6.1 | Vía Húmeda..... | 29 |
| 7.6.2 | Vía Seca | 33 |
| 7.7 | Módulo Dinámico..... | 34 |
| 7.8 | Deformación Permanente. | 35 |
| 7.9 | Ahuellamiento | 36 |
| 7.10 | Fatiga..... | 36 |
| 8 | Revisión del Estado del Arte | 38 |
| 8.1 | Según los procesos de obtención del GCR..... | 38 |
| 8.2 | Según los métodos de adición del GCR..... | 39 |
| 8.3 | Según el tamaño y la forma del GCR..... | 42 |
| 8.4 | Según el porcentaje de GCR en la mezcla asfáltica | 45 |
| 8.5 | Según el contenido de vacíos de aire en la mezcla asfáltica | 46 |
| 8.6 | Según los procesos constructivos | 48 |
| 8.7 | Consumo de llantas para el aprovechamiento en las mezclas asfálticas . | 51 |
| 9 | Casos internacionales de aplicación exitosos | 52 |
| 10 | Ventajas y Desventajas | 53 |
| 10.1 | Ventajas | 53 |
| 10.2 | Desventajas | 55 |
| 11 | Recomendaciones..... | 56 |

| | | |
|----|---|----|
| 12 | Conclusiones | 57 |
| 13 | Referencias Bibliográficas | 58 |
| | Apendice 1: Maquinaria Implementada para la obtencion del GCR. | 65 |
| | Cortadora de Llantas:..... | 68 |
| | Trituradora de Llantas: | 68 |
| | Destalonadora de Llantas: | 69 |
| | Plantas de Asfalto y Trituración de Llantas | 71 |
| | Grupo Gercons Colombia:..... | 71 |
| | IncoAsfaltos:..... | 72 |
| | Apendice 2: Experiencias Colombianas en la CONstrucción de Pavimentos con GCR. | 74 |
| | Actividades Preliminares..... | 74 |
| | Fresado..... | 74 |
| | Extensión, seriado y compactación..... | 75 |
| | Medición de deflexiones antes de la colocación de las mezclas asfálticas..... | 76 |
| | Colocación de mezcla convencional. | 77 |
| | Colocación de mezcla asfáltica proceso vía seca y vía húmeda. | 78 |
| | Apendice 3: Glosario | 79 |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Ilustración 1: MTS para Módulos Dinámicos. | 35 |
| Ilustración 2: Equipo para el ensayo de Deformación Permanente..... | 36 |
| Ilustración 3: Caucho Reciclado Tipo III. | 43 |
| Ilustración 4: Espesores recomendados en la estructura del pavimento..... | 51 |
| Ilustración 5: Diferentes características de la trituración del grano de caucho. | 66 |
| Ilustración 6: Proceso de fresado en los tramos de prueba. | 75 |
| Ilustración 7: Proceso de Extensión, seriado y compactación..... | 76 |
| Ilustración 8: Medición de Deflexiones. | 77 |
| Ilustración 9: Colocación de la mezcla convencional. | 77 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Composición química del asfalto..... | 19 |
| Figura 2: Proceso Ambiental. | 26 |
| Figura 3: Proceso Criogénico. | 27 |
| Figura 4: Proceso de modificación por la vía húmeda..... | 30 |
| Figura 5: Unidad de mezclado móvil (asfalto-caucho)..... | 32 |
| Figura 6: Maquina de Reacción Portable. | 32 |
| Figura 7: Proceso de modificación por la vía seca. | 33 |
| Figura 8: Proceso para la Trituración de Neumáticos. | 67 |
| Figura 9: Cortadora de Llantas..... | 68 |
| Figura 10: Trituradora de Llantas. | 69 |
| Figura 11: Sistema de reciclaje de llantas primera fase. | 72 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | |
|---|----|
| Gráfica 1: Costos de mantenimiento (mezclas modificadas con GCR y convencionales) | 15 |
| Gráfica 2: Profundidad de la huella vs Porcentaje de RAP. | 38 |
| Gráfica 3: Ensayo de Fatiga. | 40 |
| Gráfica 4: Deformación permanente. | 41 |
| Gráfica 5: Profundidad de la huella vs tamaño del GCR. | 42 |
| Gráfica 6: Resistencia a la tensión vs Tiempo de aplicación de carga. | 43 |
| Gráfica 7: Resistencia a la Tensión vs ciclos de carga. | 44 |
| Gráfica 8: Resistencia a la Deformación permanente. | 45 |
| Gráfica 9: Profundidad de la huella vs porcentaje de GCR. | 46 |
| Gráfica 10: Profundidad de la huella vs porcentaje de vacíos de aire. | 47 |
| Gráfica 11: Profundidad de la huella vs porcentaje de vacíos. | 48 |
| Gráfica 12: Porcentaje de vacíos vs temperatura de compactación. | 49 |
| Gráfica 13: Porcentaje de vacíos vs temperatura de compactación. | 49 |
| Gráfica 14: Resistencia Mecánica vs Temperatura de Compactación. | 50 |
| Gráfica 15: Ley de fatiga de mezclas asfálticas con GCR por vía seca. | 54 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Análisis costo del ciclo de vida de mezclas asfálticas con y sin modificación con Gcr..... | 16 |
| Tabla 2: Composición y características de los diferentes tipos de llantas..... | 23 |
| Tabla 3: Análisis Químico de la llanta. | 23 |
| Tabla 4: Especificaciones para el control de calidad..... | 73 |

1 RESUMEN

Este documento sintetiza diferentes investigaciones a nivel internacional donde se demuestra que la implementación del GCR en los pavimentos es una alternativa para solucionar problemas de tipo mecánico en los pavimentos y mitigar impactos ambientales que genera el mal manejo de las llantas deshechas.

La adición de GCR para la modificación de las mezclas asfálticas, se traduce en una gran cantidad de beneficios, debido a las investigaciones que se han avanzado en los últimos años, han demostrado que este tipo de modificaciones son más durables con respecto a las convencionales, económicas a largo plazo pues se disminuyen los mantenimientos y aumenta su durabilidad, además contribuyen a la reducción de impactos negativos para el medio ambiente como lo son, la quema indiscriminada de las llantas desechadas dando paso a las emisiones de CO₂, uno de los gases tóxicos más contaminantes del mundo causantes del calentamiento global, entre otros.

Con base en una revisión bibliográfica, el presente trabajo resume las ventajas y desventajas técnicas, económicas y ambientales que se obtienen al hacer uso del grano de caucho reciclado para mejorar las mezclas asfálticas.

PALABRAS CLAVE: asfalto-caucho, asfalto modificado, mezcla asfáltica modificada, grano de caucho de llanta.

2 ABSTRACT

This document synthesizes different researches at an international level where it is shown that the implementation of the GCR in the pavements is an alternative to solve problems of structural type in the pavements and to mitigate environmental impacts generated by the mismanagement of the disused tires.

The addition of GCR for the modification of asphalt mixtures results in a great number of benefits, due to the research that has advanced in the last years, identifying that this type of modifications are more durable with respect to conventional, long term Term because it reduces the maintenance and increases its durability and mainly contribute to the reduction of negative impacts for the environment as they are, the indiscriminate burning of discarded tires giving way to CO2 emissions, one of the most polluting toxic gases Of the world causing global warming.

Based on a bibliographical review, this paper summarizes the technical, economic and environmental advantages and disadvantages of using recycled rubber grain to improve asphalt mixtures.

KEYWORDS: asphalt-rubber, modified asphalt, modified asphalt mix, rubber tire of rim.

3 INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta las grandes exigencias que demanda los altos flujos vehiculares, el mal estado de las vías y los grandes impactos ambientales que genera el desecho de las llantas fuera de uso, se implementan cada vez más nuevas tecnologías que contribuyan con el desarrollo y mejor funcionamiento de los pavimentos para que se cuente con una infraestructura de gran calidad para satisfacer las necesidades del país. Según el estado del arte y los antecedentes que se obtienen, la implementación del GCR, es una alternativa favorable para el mejoramiento de la malla vial de Bogotá.

El caucho es obtenido de manera viable y económica usando llantas desechadas las cuales deben ser molidas hasta obtener tamaños apropiados para cumplir con estándares de calidad, contribuyendo en la solución del problema ambiental que estos generan al finalizar su vida útil; este caucho recibe el nombre de grano de caucho reciclado o GCR. Puede ser adicionado a las mezclas asfálticas mediante dos procesos, mezclándolo con el ligante o proceso húmedo, y mezclándolo con los agregados o proceso seco.

La utilización del GCR para modificar las mezclas asfálticas cuenta con grandes beneficios para la infraestructura vial, además de beneficios medioambientales debido al aprovechamiento de las llantas usadas, las cuales son un componente de contaminación a gran escala debido a su corta vida útil y su mala disposición final, entre los que se encuentran la quema indiscriminada a cielo abierto lo que representa contaminación debido a emisiones de CO₂.

La adición del material GCR en asfaltos modificados en la ciudad de Bogotá, nace a partir de investigaciones realizadas por parte del Instituto de Desarrollo Urbano junto con la Universidad de los Andes durante el año 2005, con el propósito de mejorar el comportamiento de las mezclas colocadas en la malla vial.

4 OBJETIVOS

4.1 General

Revisar el estado del arte sobre la implementación del Grano de Caucho Reciclado en las mezclas asfálticas.

4.2 Específicos

- Justificar las razones para implementación de pavimentos con GCR.
- Seleccionar información existente acerca de los factores que afectan el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas con GCR.
- Identificar las ventajas y desventajas del uso del grano de caucho reciclado para el mejoramiento de los pavimentos.

5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el mundo las llantas son parte principal de la economía, debido a que se encuentran en el medio de transporte diario del ser humano, carros, motos, buses, entre otros, permitiendo la movilización por las vías terrestres. Las llantas son uno de los elementos que más se desechan en el mundo y no son biodegradables (es decir que no pueden descomponerse). Las dificultades que se han presentado al gestionar el destino de las llantas, ha contribuido considerablemente en los problemas del medio ambiente en los últimos años.

El desecho a nivel mundial de llantas anualmente es muy elevado generando un alto impacto negativo en el medio ambiente, por ejemplo, aproximadamente 300 millones de llantas de neumático son desechadas anualmente en los Estados Unidos (Shen, 2007), Botero (2005) dice que en Puerto Rico se produce un neumático de desecho por habitante por año (1 neu/hab/año), Neto (2003) dice que en Brasil se producen anualmente cerca de 45 millones de llantas, de las cuales 30 millones son desechadas, Magalhães (2003) menciona que en Brasil hay una cantidad estimada de 900 millones de neumáticos colocados de manera inapropiada en el medio ambiente.

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010), un estudio realizado por la Unión Temporal OCADE LTDA / SANIPLAN / AMBIENTAL S.A. concluyó que durante el año 1999 se generaron 1.981.375 unidades de llantas usadas para la ciudad de Bogotá. Para mediados de agosto del año del 2010 se estimó una generación de llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C. de 2.642.938, es decir, un 25% más que el año 1999. Adicionalmente, en el marco nacional se estimó para el año 2008 un consumo de 4.493.092 de llantas discriminadas así: 1.067.072 llantas de camiones y busetas, y 3.426.020 llantas de automóviles y camionetas. Considerando un promedio de recambio de llantas de 18 meses y pesos promedio para carcasas usadas de 7 kg por llanta para auto, de 15 kg para camioneta y de 50 kg para camión, la generación de residuos de llantas de automóvil, camioneta, camión y buseta se estima en 61.000 toneladas al año.

Bogotá presenta grandes problemas principalmente porque la mayoría de las llantas son dispuestas como basura en las calles, lo que representa impactos negativos tanto por dañar la armonía paisajista de la ciudad como para la atmósfera, corriendo el riesgo de ser quemadas a cielo abierto, proceso que

produce grandes emisiones de CO₂, uno de los mayores contaminantes del mundo y uno de los gases prohibidos en el protocolo de Kioto. Este protocolo es un acuerdo internacional que tiene como objetivo principal eliminar o reducir las emisiones de 6 gases tóxicos que causan el calentamiento global, entre los cuales se encuentra el dióxido de carbono (CO₂).

Para efectos medioambientales, una llanta necesita de gran energía para ser fabricada, medio barril de petróleo crudo para fabricar un neumático de camión según Waste Ideal (Plan español para el reciclado y reutilización de neumáticos fuera de uso, 2007), en esta revista se encuentra como las emisiones de CO₂ contribuyen con el calentamiento global, generando cambios irreversibles en el medio ambiente.

Además, las acumulaciones de neumáticos forman arrecifes donde la proliferación de roedores, insectos y otros animales portadores de enfermedades constituye un problema para la salud. La reproducción de ciertos mosquitos, que transmiten por picadura fiebres y encefalitis, llega a ser 4.000 veces mayor en el agua estancada de un neumático que en la naturaleza (Waste Ideal MAGAZINE, 2007).

La malla vial de Bogotá está comprendida en un alto porcentaje por pavimentos flexibles que presentan defectos dados por su vida útil reducida. En el mayor de los casos esta vida útil reducida es causada por unos bajos estándares de calidad desde la producción del cemento asfáltico, hasta la construcción como tal del pavimento; sin embargo la ciudad de Bogotá presenta altos flujos vehiculares, lo cual requiere pavimentos con especificaciones mucho más altas en cuanto a su capacidad de carga, esto requiere materiales de mayor calidad y que aumenten las capacidades de carga de los pavimentos.

Otra problemática relacionada con los pavimentos defectuosos de la capital son los casos de accidentalidad a causa de las maniobras necesarias que los conductores tienen que hacer para esquivar la gran cantidad de baches que aquí existe, así como los daños continuos en los vehículos que por allí transitan.

6 JUSTIFICACIÓN

Además del uso vehicular, las llantas tienen diferentes destinos después de cumplir con su vida útil (en los vehículos):

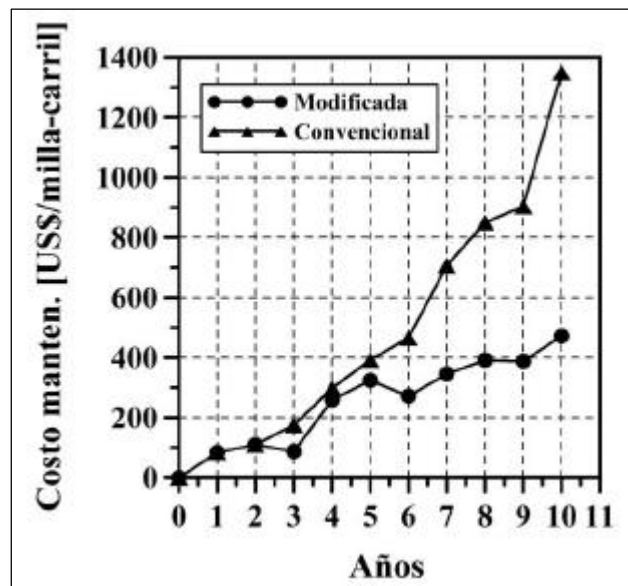
- Aprovechamiento energético.
- Arrecifes artificiales.
- Para control de erosión o estabilización de taludes.
- Plantación de árboles.
- Señalizaciones.
- Protección de equipos.
- Paredón en polígonos de tiro.
- En áreas deportivas.
- Muros de contención.
- Barreras en pistas de karts.
- Para delimitación de casas.
- Modificador de concretos hidráulicos.
- Modificador de asfaltos y/o mezclas asfálticas.

Desde hace algunos años se ha profundizado en la modificación de las mezclas asfálticas con presencia de GCR y se ha encontrado que además de mitigar problemas medioambientales reutilizando las llantas desechas mejoran considerablemente las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas aumentando su vida útil y reduciendo costos de mantenimiento a lo largo del tiempo de funcionamiento.

A continuación se enumeran las razones para implementar pavimentos con GCR:

- El desecho de las llantas presenta un problema medio ambiental importante. Las llantas son un sitio potencial de incubación de mosquitos en épocas de lluvia, contaminan visualmente el ambiente, además al ser desechas al aire libre, están propensas a incendios, además la principal forma de deshacerse de estos objetos es quemándolos a cielo abierto produciendo emisiones de gases que afectan el sistema respiratorio, la piel, las membranas mucosas, el sistema nervioso central, y en muchas ocasiones contienen contaminantes carcinogénicos y mutagénicos, así como la producción de gases que contribuyen al deterioro del medio ambiente.

- Para mediados de agosto del año del 2010 se estimó una generación de llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C. de 2.642.938, pero esta cifra fácilmente aumenta con el pasar de los años ya que la tendencia del parque automotor en los últimos 30 años ha sido incrementar en número.
- **Botero (2005)**, dice que el consumo se estima en unos 1553 neumáticos por kilómetro-carril para una capa de 5.08 cm de espesor de mezcla modificada con asfalto-caucho. **Rubber & Plastic News (1998)** calculan que la cantidad para construir un km de vía con pavimentos modificados con GCR es de 13.6 toneladas.
- IDU y Universidad de Los Andes (2002) dice que el costo/eje (beneficio-costos) puede disminuirse en un 20% y 57% cuando se modifica la mezcla por vía seca utilizando 1% y 2% de Gcr respectivamente, con respecto al peso total de la mezcla. Las mezclas modificadas con asfalto-Gcr son más durables y por lo tanto con menor necesidad de mantenimiento (**Lee, 2008**). En la **Gráfica 1** se resalta la disminución de costos en el tiempo por mantenimiento.



Gráfica 1: Costos de mantenimiento (mezclas modificadas con GCR y convencionales)
Way (1999)

En la **Tabla 1** se compara el costo de vida de un pavimento convencional contra un pavimento modificado con GCR.

**Tabla 1: Análisis costo del ciclo de vida de mezclas asfálticas con y sin modificación con Gcr.
Botero (2005)**

| Escenario | Valor actualizado del Costo (\$/m²) | | | | | Ahorro con caucho asfalto (\$/m²) |
|---|-------------------------------------|---------------|--------|---------|-------|---|
| | Rehabilitación | Mantenimiento | Ahorro | Retraso | Total | |
| Preservación - Sello granular | | | | | | |
| Convencional | 19.45 | 1.71 | 1.15 | 2.73 | 22.74 | 4.91 |
| Caucho - Asfalto | 16.39 | 1.69 | 2.30 | 2.05 | 17.92 | |
| Preservación - Cubierta delgada de Hot Mix Asphalt | | | | | | |
| Convencional | 22.02 | 1.75 | 0.75 | 2.87 | 25.89 | 6.20 |
| Caucho - asfalto | 18.06 | 1.66 | 2.15 | 2.14 | 19.70 | |
| Cubierta estructural | | | | | | |
| Convencional | 24.11 | 1.66 | 1.90 | 2.40 | 26.28 | 8.78 |
| Caucho - asfalto | 14.20 | 1.78 | 0.60 | 2.13 | 17.50 | |

- La introducción en Bogotá D.C., del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) mejorará la movilidad vehicular por las vías de la ciudad ya que se disminuirá el número de vehículos de servicio de transporte público y privado (con su debida incentivación). Sin embargo, los nuevos vehículos pasarán por las vías más cargados, por el carril derecho y a menor velocidad generando mayor agresividad y deterioro de las estructuras de pavimento. Lo anterior conduce a la necesidad de construir estructuras de pavimentos con materiales más durables y resistentes a cargas cíclicas y monotónicas. (**Rondón, 2011**).
- Más del 65% de las vías de Bogotá están construidas con pavimentos flexibles.
- El Instituto de Desarrollo Urbano - IDU (2009), según su base de datos, dice que la malla vial a diciembre de 2009 en la ciudad de Bogotá D.C., alcanza 15657.3 km-carril de los cuales el 94.53% corresponden al Subsistema Vial (malla vial arterial con una composición del 19%, intermedia con 28% y local con 53%) y el porcentaje restante (5.47%) al Subsistema de Transporte (troncales de Transmilenio). Del Subsistema Vial en estado malo y regular se encuentran el 63.2% de las vías (malo 40.3% y regular 22.9%).

7 MARCO TEÓRICO

La implementación de asfaltos modificados en la construcción ha avanzado en los últimos años, extendiéndose a nivel mundial como una respuesta a condiciones difíciles como la vida útil de los pavimentos y de esta manera encontrar un mejor desempeño que permita prolongar su duración.

El desarrollo con el sé que se avanza la infraestructura vial en Colombia, en especial en Bogotá, indica que es necesario que se le dé más importancia a los trabajos de investigación que tienen como objetivo principal nuevas tecnologías para mejorar los materiales, que ofrezcan soluciones a múltiples problemáticas y así garantizar el buen funcionamiento de las vías. Entre los beneficios que se obtienen a partir de la modificación de los pavimentos con GRC se encuentran: Disminución en la susceptibilidad térmica, ayuda a mejorar el comportamiento respecto a la fatiga, aumenta la resistencia al envejecimiento, entre otras.

7.1 Asfaltos

El asfalto es un material de particular interés para el ingeniero porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente por la aplicación al calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación. (Velázquez, 1977).

7.1.1 Propiedades físicas

Es un producto bituminoso semi-sólido a temperatura ambiente, preparado a partir de hidrocarburos naturales mediante un proceso de destilación, el cual contiene una proporción muy baja de productos volátiles, posee propiedades aglomerantes y es esencialmente soluble en tricloroetileno.

Este es un material visco-elato-plástico, lo que quiere decir que su comportamiento tiene que ver directamente con la temperatura y la frecuencia con la que se le apliquen las cargas, con deformaciones recuperables (elásticas) y no recuperables (plásticas).

Es una sustancia plástica que da gran flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina. Su color es plomo (gris oscuro), de consistencia sólida, semisólida o líquida, esto dependiendo de la temperatura a la que es expuesto. (Angulo, 2005).

7.1.2 Composición Química

Para garantizar un buen funcionamiento en la pavimentación es importante tener conocimientos sobre la composición química del asfalto para tener control de las propiedades físicas.

La composición química de un asfalto es muy compleja, al igual que el petróleo crudo, es una mezcla de numerosos hidrocarburos, parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos.

Los hidrocarburos que hacen parte del asfalto, forman una solución líquida en la que un grupo de moléculas de hidrocarburos pesados (asfaltenos) se encuentran dispersas en un medio aceitoso más ligero (máltenos) compuesto por hidrocarburos saturados, resinas y aromáticos, sin que exista una separación entre estas dos fases sino una transición. (Angulo, 2005).

Cuando el asfalto es disuelto en n-heptano, los materiales duros son precipitados, estos materiales son llamados asfaltenos, nombre propuesto por Boussingault en 1837. Existen otras fracciones asfálticas precipitadas por otros solventes, pero esta es la mejor manera de distinguir a estos materiales como insolubles en n-pentano. (Repsol, 2000-2017).

El siguiente esquema demuestra la composición de un asfalto:

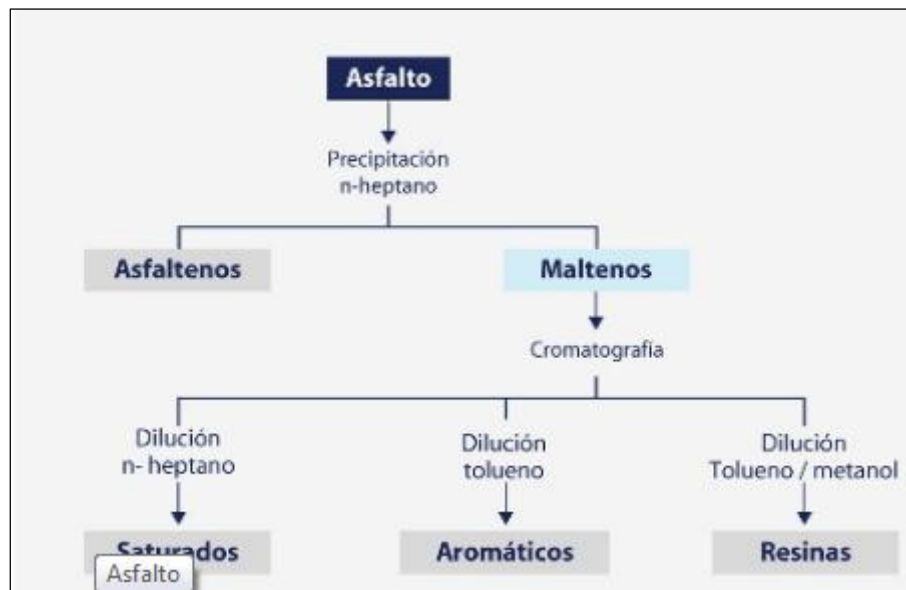


Figura 1: Composición química del asfalto.
(Repsol, 2000-2017).

7.1.2.1 Asfaltenos:

Son sustancias que están constituidos por compuestos aromáticos, de color negro o marrón que contienen elementos químicos como el nitrógeno, azufre, carbono, oxígeno. Son compuestos polares, solubles en benceno.

7.1.2.2 Maltenos:

Son sustancias constituidas principalmente por resinas, saturadas y aromáticas. Muy polares y al igual que los asfaltenos, son compuestos de carbón, hidrogeno y con cantidades menores de hidrogeno, oxígeno y azufre.

7.1.2.3 Aromaticos:

Estos constituyen entre el 40 y el 65% de la composición total de los asfaltos, son compuestos en los que sobresalen las moléculas insaturadas, de color amarillo o rojo a temperatura ambiente.

7.1.2.4 Saturados:

Son líquidos incoloros compuestos de cadenas lineales, ramificadas con trazas de cicloparafinas. Los hidrocarburos saturados actúan como antioxidantes e

impermeabilizantes, tienen menor poder de adherencia y causan deformidades al asfalto en el pavimento.

7.1.3 Clasificación de los asfaltos:

Estos se clasifican según su aplicación o según su uso:

- Pavimentación: Mezclas cerradas (Stone Mastic Asphalt), Mezclas abiertas (Gap Graded), drenantes, base asfáltica.
- Riegos: Matapolvos, imprimaciones, riegos de liga.
- Tratamientos y lechadas: sellos de arena, tratamientos superficiales.

Clasificación de los asfaltos en pavimentación:

7.1.3.1 Asfaltos líquidos

Compuestos de una base asfáltica (cemento asfáltico) y un fluidificante volátil, en el cual es agregado el solvente para disminuir la viscosidad del asfalto y de esta manera poderlo mezclar con los agregados.

7.1.3.2 Cemento asfáltico

Es el más común y utilizado. Es un material visco-elástico rígido a bajas temperaturas (bajo cero) y fluido a altas temperaturas, es obtenido mediante la refinación del petróleo, en las etapas de destilación.

7.1.3.3 Emulsiones asfálticas

Es un sistema heterogéneo de dos fases inmiscibles, como el asfalto y el agua, a la que se le incorpora un activador de superficie.

7.1.3.4 Naturaleza reológica del asfalto

La reología es una ciencia que estudia las deformaciones y el flujo de la materia. Es importante conocer los estudios reológicos del asfalto ya que estos correlacionan la estructura física de sus componentes con su composición química para lograr un flujo característico.

7.2 Pavimento

Los pavimentos son las capas superpuestas que están constituidos por uno o más materiales que son colocados sobre un terreno nivelado y compactados, para aumentar su resistencia y así servir para la circulación de vehículos o personas. Los materiales utilizados en la pavimentación urbana, industrial o vial son, materiales rocosos, el hormigón y las mezclas asfálticas.

Actualmente existen muchas investigaciones sobre la utilización de pavimentos que ayudan al medio ambiente.

7.3 Grano de Caucho Reciclado (GCR)

El GCR es un material obtenido de las llantas en desuso de los vehículos automotores, que por lo general tiene un destino no muy controlado ambientalmente, rellenos sanitarios, plantas térmicas, basureros a cielo abierto, entre otros, que generan un daño ambiental importante.

Se obtiene mediante procesos de molienda de llantas usadas, disminuido en tamaño, este material es utilizado en diferentes obras de ingeniería civil, como lo son en rellenos de terraplenes, materiales de contención, pisos de parques, como modificador en las mezclas asfálticas, entre otros.

En las diferentes revisiones bibliográficas realizadas en esta investigación se encontró que el grano de caucho se ablanda y se expande a medida que va reaccionando con el asfalto. La adición de éste a las mezclas produce un bitumen más espeso, lo cual tiene que ver con que se presente mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación.

7.3.1 Composición de las llantas

Están compuestas por tres productos básicamente: caucho natural y sintético, acero y fibra textil. Este caucho que se utiliza en la producción de las llantas está compuesto por un grupo de polímeros (compuestos químicos con un elevado peso molecular) como lo son el polisopreno sintético, el polibutadieno y el más común que es el estireno-butadieno, todos usados en hidrocarburos.

Los polímeros son utilizados para la modificación de las mezclas asfálticas en busca de mejorar sus propiedades y así cumplir con los requerimientos para un proyecto de calidad, en donde se pretende principalmente optimizar la elasticidad

y flexibilidad, la consistencia y la durabilidad para evitar que una mezcla asfáltica presente fisuramiento, deformaciones o que tenga desprendimientos. La implementación de asfaltos modificados con polímero es una técnica que involucra bondades notorias en las mezclas asfálticas diseñadas, entregando a los pavimentos un mejor desempeño una vez se somete al efecto del tránsito y condiciones climáticas. (Carreño y Reyes. 2015).

Los elastómeros son polímeros que muestran comportamientos elásticos. Son materiales cuyas dimensiones tienen cambios cuando se les aplica una tensión y regresan a su tamaño original cuando dicha tensión es eliminada, esto si la fuerza que es aplicada se encuentra dentro del rango elástico que tenga el material. Se comenzaron a emplear a partir del siglo XIX para aplicaciones como los neumáticos de automóvil. Existen diversos tipos de materiales elastómeros entre los que se encuentran: el caucho sintético, el natural, neopreno, caucho nitrilo, las siliconas, entre otros.

Los cauchos naturales junto con los sintéticos como el SBR y SBS son la materia prima que compone las llantas.

El caucho natural es un polímero elástico que surge de la emulsión de una sustancia lechosa más comúnmente conocida como látex en la savia de algunas plantas, principalmente las del género Hevea.

El caucho sintético es el más importante y utilizado debido a sus grandes propiedades y bajo costo. Este tipo de elastómero es un material que presenta propiedades mecánicas como el poder sufrir mayores deformaciones elásticas bajo tensión con respecto a otros materiales y aun así recupera su tamaño original sin una deformación permanente. Es utilizado como un remplazo del caucho natural, en especial cuando se necesita mejorar las propiedades de los materiales. El caucho SBR (estireno-butadieno) tiene mayor resistencia al desgaste y presenta mayor generación de calor. (Carreño y Reyes. 2015).

En la

Tabla 2 y en la **Tabla 3** se expone la composición y las características de diferentes tipos de llantas y los componentes químicos respectivamente. Esta composición suele variar según el tipo de neumáticos y el país de fabricación.

**Tabla 2: Composición y características de los diferentes tipos de llantas.
Rubber Manufacturers Association.**

| Automoviles y Camionetas | | Camiones y Microbuses | |
|--|----------|---|----------|
| Caucho natural | 14 % | Caucho Natural | 27 % |
| Caucho sintético | 27% | Caucho sintético | 14% |
| Negro de humo | 28% | Carbón negro | 28% |
| Acero | 14 - 15% | Acero | 14 - 15% |
| Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc. | 16 - 17% | Fibra, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc. | 16 - 17% |
| Peso promedio: | 8,6 Kg | Peso promedio: | 45,4 Kg. |
| Volumen | 0.06 m3 | Volumen | 0.36 m3 |

**Tabla 3: Análisis Químico de la llanta.
Holderbank 1997**

| Elemento | Porcentaje |
|--|------------|
| Carbono (C) | 70 |
| Hidrogeno (H) | 7 |
| Azufre (S) | 1..3 |
| Cloro (Cl) | 0,2...0,6 |
| Fierro (Fe) | 15 |
| Oxido de Zinc (ZnO) | 2 |
| Dióxido de Silicio (SiO ₂) | 5 |
| Cromo (Cr) | 97-ppm |
| Níquel (Ni) | 77-ppm |
| Plomo (Pb) | 60-760ppm |
| Cadmio | 5-10ppm |
| Talio | 0,2-0,3ppm |

Por otro lado el GCR posee componentes que pueden contribuir al buen desempeño del asfalto, estos son:

- **Negro de Humo**: este componente se destaca por su acción específica contra el desgaste de las llantas al contacto con la superficie del pavimento, permitiendo aumentar la duración de la llanta de los vehículos automotores. En la mezcla asfáltica ha demostrado aumentar las propiedades de refuerzo del cemento asfáltico y ayuda a disminuir el envejecimiento.
- **Antioxidantes**: retardan el deterioro del caucho por oxidación.
- **Aminas**: evitan el endurecimiento progresivo del caucho, el aumento de su fragilidad y la pérdida de elasticidad.
- **Aceites aromáticos**: prolongan la vida de las mezclas asfálticas modificadas con GCR.

7.4 Procesos de Obtención del Grano de Caucho Reciclado

Estos procesos de molienda tienen como objetivo llegar a un tamaño máximo de partícula de $\frac{1}{4}$ ". Además estos se diferencian en cuanto a la forma y la textura del GCR. Cada proceso debe evaluarse según los costos, como también el que se garantice que las partículas de GCR se encuentren libres de acero, fibras y otros productos que afecten de manera negativa la calidad del producto. A continuación se identifican tres diferentes formas de molienda de las llantas.

7.4.1 Proceso Ambiental

En el proceso ambiental como muestra la **Figura 2**, está presente la utilización de una serie de granuladores que reducen el tamaño del caucho mediante el corte por la acción de cuchillas. Son molinos contruidos generalmente para separar los componentes metálicos y así evitar dañarlos, para eliminar la parte textil se usan cintas o bandejas vibratorias que originan la compresión de las fibras, las cuales son separadas por tamices.

El tamaño de las partículas es controlado mediante tamices ubicados dentro de la maquina; sin embargo estos tamices pueden ser reemplazados para dar un tamaño esperado.

La temperatura de los neumáticos inicialmente es equivalente a la temperatura ambiente, pero esta aumenta considerablemente en el proceso de molienda en la fricción de los neumáticos con las cuchillas.

En este proceso, se encuentran presentes varios pares de molinos para dar el tamaño esperado (2 o 3 molinos). Los rodillos están uno en frente del otro, con una distancia específica que es la que le da el tamaño al grano de caucho. El caucho pasa por esta variedad de molinos con el fin de facilitar la separación de los demás materiales que se presentan en la llantas desechas.

Las plantas que tratan este proceso necesitan tener alto mantenimiento continuo en las maquinas, debido a que se presentan grandes desgastes en las cuchillas de corte y su costo tiene a ser más elevado.

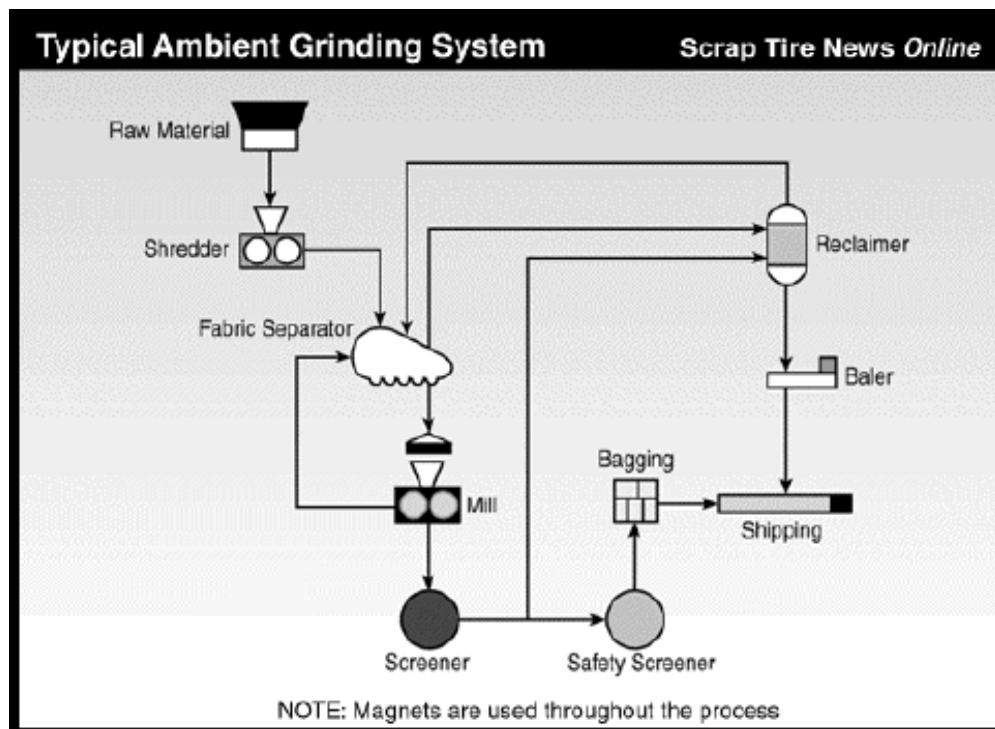


Figura 2: Proceso Ambiental.

<http://www.scrap tire news.com/areas/crumb/process.html>.

El proceso ambiental, también conocido como el proceso de molienda a temperatura ambiente, el cual normalmente contiene las siguientes actividades; separación del metal, separaciones de la fibra, reducción a polvo de GCR, empaquetado, pesado y transporte.

El acero es separado mediante la utilización de imanes y la fibra mediante por medio de aspiración y de selección. Los imanes son utilizados a lo largo de las etapas del proceso.

Normalmente el tamaño de reducción al ser triturado es aproximadamente de 2 pulgadas. El exceso de calor puede degradar el caucho y, si no se enfria adecuadamente la combustión se puede producir durante el almacenamiento.

7.4.2 Proceso criogénico

Este proceso como se observa en la **Figura 3** busca obtener las partículas en los tamaños mínimos esperados, utilizando un método para disminuir la temperatura del neumático a una temperatura muy baja. Se emplea nitrógeno u otros

materiales que disminuyan considerablemente la temperatura del neumático. Se reduce el caucho a partículas entre tamaños de ¼" a mínimo tamiz número 30.

En la molienda criogénica, los materiales son enfriados mediante nitrógeno o dióxido de carbono a muy bajas temperaturas (-80 °F, -62°C aproximadamente).

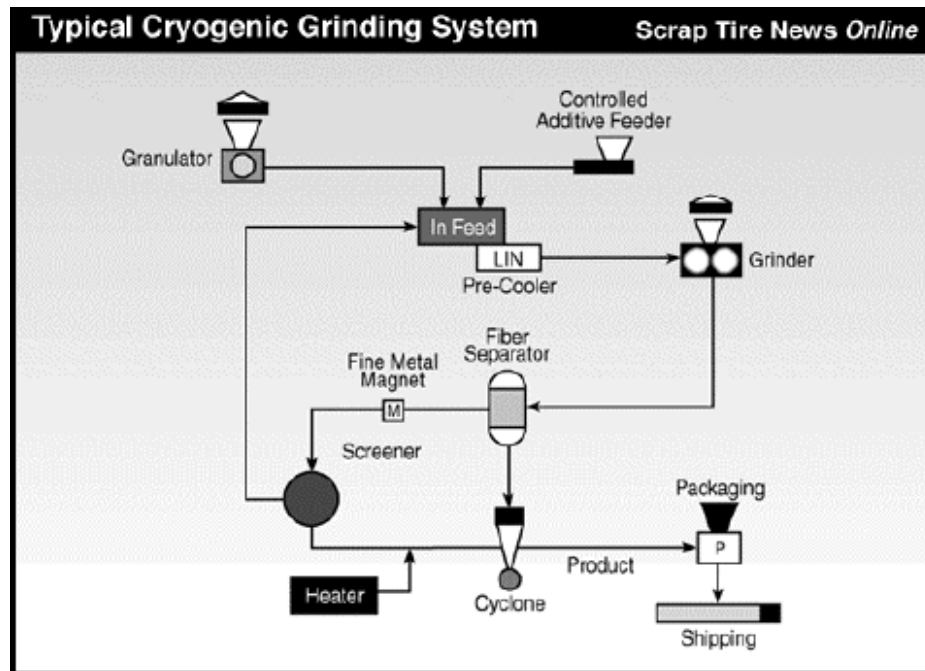


Figura 3: Proceso Criogénico.

<http://www.scraptirenews.com/areas/crumb/process.html>.

En el proceso de molienda criogénica se hace uso de temperaturas criogénicas (conjunto de técnicas que son utilizadas para enfriar un material a la temperatura de ebullición del nitrógeno o a temperaturas más bajas), en donde se puede aplicar en cualquier etapa de la reducción del neumático. El material se puede enfriar en una cámara de estilo túnel, sumergido en un baño de nitrógeno líquido para reducir la temperatura del grano de caucho.

El caucho enfriado se muele en una unidad de reducción de tipo impacto, en un molino de martillo. La molienda criogénica evita la degradación térmica del caucho y produce un alto rendimiento del producto que queda libre de casi toda la fibra o de acero, que son liberados mientras el proceso.

Para el caucho proveniente de las llantas usadas, el acero se separa del producto mediante imanes y la fibra mediante cribado (compuesto de una tela metálica fina

con el fin de separar los materiales). Puede ser un sistema de cuatro fases, que incluye la reducción del tamaño inicial, enfriamiento, separación y molienda. Este proceso requiere menos energía que otros y produce grano de caucho de gran calidad.

El tamaño, la forma y las características de las partículas de caucho por molienda criogénica son diferentes a las obtenidas por otras moliendas. "Sin embargo, las partículas del polvo obtenidas por molienda criogénica presentan una superficie relativamente suave, un amplio rango de tamaño de partícula así como una mínima oxidación superficial. Estas diferencias en la naturaleza y reactividad pueden producir diferentes propiedades en el producto final."

Este proceso presenta un costo más elevado de operatividad debido al precio del nitrógeno líquido.

7.4.3 Otros procesos

Existen otros procesos de molienda en los cuales se desarrolla una molienda-húmeda, siendo utilizadas para producir tamaño de granos finos (Tamiz 40 y 60) y muy finos (Tamiz 60) donde requiere de una segunda etapa de intensidad molienda.

Este proceso es conocido como micro molienda, es un proceso de molienda que está patentado en donde las partículas diminutas de caucho son reducidas a un tamaño menor por molienda entre dos ruedas muy juntas en un medio líquido, este medio líquido, en el mayor de los casos es agua.

7.5 Consideraciones y definiciones internacionales para la implementación del GCR en las mezclas asfálticas

La Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) por sus siglas en inglés, encargada de probar la resistencia de los materiales, define el asfalto-caucho como "una mezcla de cemento asfáltico, caucho de neumático reciclado y ciertos aditivos, en la que el componente de caucho es de al menos 15% en peso de la mezcla total y ha reaccionado con el cemento asfáltico en caliente lo suficiente como para causar la hinchazón de las partículas de caucho "(ASTM D8, 2009).

La Administración Federal de Carreteras (FHWA) describe el grano de caucho como "un caucho de llantas de desecho que ha sido procesado por molienda

ambiente o métodos de granulación, que lo reduce a partículas que generalmente no superan los 4,75 mm (No. 4) de tamiz" (McDonald, 1966; FHWA, 1993).

Charles H. McDonald fue quien desarrollo el primer acercamiento exitoso en Estados Unidos, entré las mezclas asfálticas y el grano de caucho reciclado para cumplir con los trabajos de reparaciones en la ciudad de Phoenix (Arizona, EE.UU.). McDonald estableció que la mezcla en caliente de asfalto y grano de caucho, durante un periodo de reacción entre 40 minutos y una hora, daba origen a un material con nuevas propiedades. El empleo de este material se extendería a tratamientos superficiales y mezclas asfálticas en caliente construidas en los estados de Arizona, Texas y Florida durante las décadas de 1970 y 1980 (**Carlson & Zhu, 1999**).

Para el año de 1985 el instituto de transporte de Texas, realizo diferentes estudios e investigaciones sobre las mezclas que eran elaboradas a partir del grano de caucho reciclado y llego a la conclusión: "el material es reciclable y el material reciclado, si se diseña y construye apropiadamente, debería tener un comportamiento adecuado a largo plazo" (**Carlson & Zhu, 1999**).

7.6 Métodos de adición de GCR en las mezclas asfálticas.

La implementación del Grano de Caucho Reciclado (GCR) a los pavimentos traen beneficios físico-mecánicos; sin embargo hay dos vías por las cuales se adiciona. Las características que adquiere el pavimento varían según el modo por el cual se va a adicionar al pavimento.

7.6.1 Vía Húmeda

Esta tecnología genera un producto conocido como "Asfalto modificado con caucho" o "Asfalto-Caucho". Este proceso de modificación aumenta la viscosidad del cemento asfáltico dándole unas características particulares. La plasticidad de esta mezcla disminuye en temperaturas altas, lo cual es un punto a favor para evitar fenómenos como el ahuellamiento. Además en bajas temperaturas, la flexibilidad de esta mezcla aumenta, esto traduce un mejor comportamiento ante problemas de posible fisuración.

En este proceso hay que tener varios factores en cuenta que son decisivos en el resultado esperado de esta mezcla "asfalto-caucho". Estos factores son, el tamaño, la textura y la proporción del GCR, el tipo del cemento asfáltico, el tiempo y la temperatura de mezclado, el grado de agitación mecánica durante la reacción

de la mezcla (GCR con el cemento asfáltico), el componente aromático del cemento asfáltico y el uso de otros aditivos



Figura 4: Proceso de modificación por la vía húmeda.
<http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>

En la **Figura 4** se describe este proceso que es conocido también como proceso McDonald y específicamente consta de un tanque donde se mezcla el betún (cemento asfáltico) con el GCR con una serie de tornillos sin fin para asegurar la circulación de la mezcla para que haya una reacción óptima entre estos dos materiales durante un periodo suficiente (por lo general este periodo está entre los 45 y 60 minutos), paralelo a esto se calientan los agregados pétreos (4 y 5) para una mezcla posterior con el cemento asfáltico modificado (6) y poder así ser transportado al lugar de construcción (7). En este transporte se debe mantener una temperatura específica que va desde los 160°C a los 190°C, para evitar problemas de manejabilidad del material en el campo y pérdidas de propiedades mecánicas.

Adicional a esta descripción general, específicamente existen tres tecnologías que varían según la especificación del proyecto.

7.6.1.1 Tecnología Continua.

Este proceso consiste en un sistema de producción de mezclado de asfalto y caucho de manera continua. La tecnología de mezclado continua fue desarrollada en Florida a finales de los años 1980 y es conocida como Florida Wet Process. En este procesos, un tamaño fino 0.18 mm (tamiz No. 80) de GCR es mezclado con el cemento asfáltico en un proceso continuo. La tecnología de Florida se diferencia del proceso McDonald en varios aspectos: emplea bajos porcentajes de GCR, entre 8 y 10 porciento, el tamaño de la partícula de caucho requerida es más pequeña, disminuye la temperatura de mezclado, y acorta el tiempo de reacción. El proceso húmedo de Florida aún no has sido patentado

7.6.1.2 Tecnología Terminal.

La tecnología de mezclado Terminal es un proceso húmedo que brinda la capacidad de mezclar o combinar el cemento asfáltico con el GCR y conservar el producto durante amplios periodos de tiempo. Este producto “asfalto-caucho” tiene una amplia duración de almacenamiento y puede ser mezclado en la refinería donde se produce el cemento asfáltico por cualquiera de las dos tecnologías, Continua o por Bachadas.

7.6.1.3 Mezclado en Campo.

Generalmente las mezclas asfálticas modificadas con GCR, se producen en plantas ubicadas en lugares diferentes a los de la construcción de los pavimentos. Estas plantas necesitan ciertas modificaciones para producir asfalto-caucho, las modificaciones incluyen la adaptación de tanques de mezclado con calefacción, tanques de reacción con calefacción, sistemas de adición de GCR, y tanques de almacenamiento que mantengan una temperatura adecuada para este tipo de mezclas.

Sin embargo hace unos años estos procesos se han implementado con remolques que se puedan transportar con el fin de crear estas mezclas in situ, para ahorrar costos en transporte (ya que el transporte de esta mezcla tan viscosa necesita temperaturas más altas para mantener el estado adecuado en cuanto a consistencia). Estos equipos móviles, llevan a cabo el proceso de modificación del asfalto (vía húmeda).

En el “proceso móvil”, la unidad de mezclado recibe el GCR en la tolva y este se transporta a la cámara de mezcla para hacerla efectiva (la mezcla) con el asfalto y el GCR (**Figura 5**). Luego este se almacena en la cámara de reacción portable

(Figura 6) una vez este proceso esté completo, se transporta a la tanque de mezcla asfáltica en caliente y ser puesta in situ con las máquinas para colocar el material.

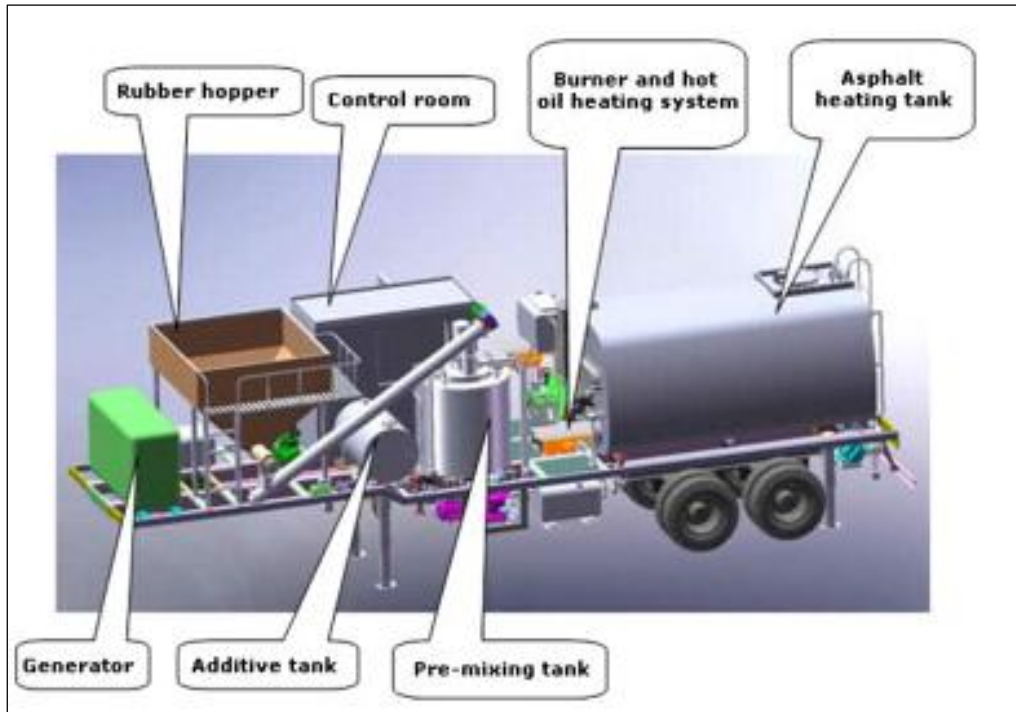


Figura 5: Unidad de mezclado móvil (asfalto-caucho).
[Http://www.dgroadmachinery.com/3-3-asphalt-rubber-blending-plant.html](http://www.dgroadmachinery.com/3-3-asphalt-rubber-blending-plant.html)

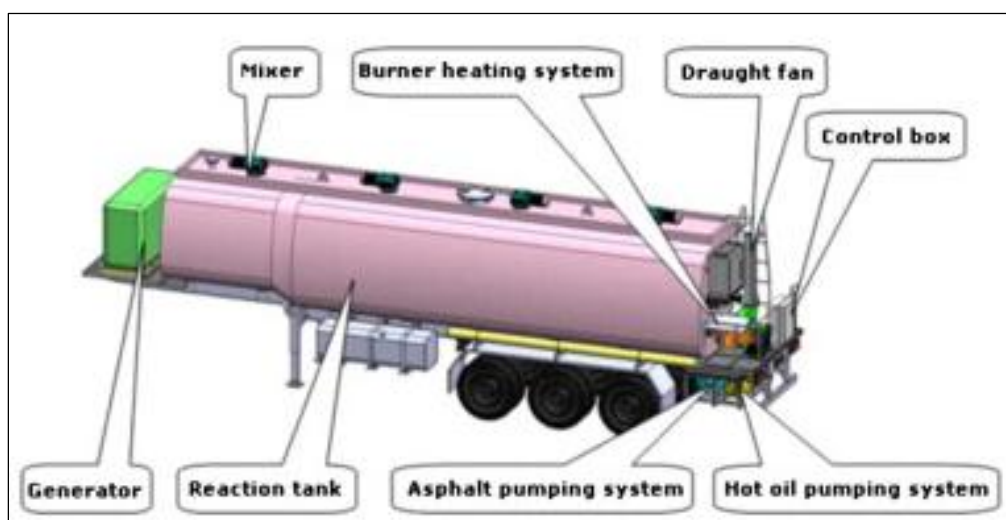


Figura 6: Máquina de Reacción Portable.

7.6.2 Vía Seca

El proceso seco implica la mezcla del grano de caucho reciclado con agregados antes de agregar el cemento asfáltico a la mezcla. A diferencia del proceso húmedo, este tipo de mezcla tiene grandes inconvenientes técnicos. La falta de estándares de calidad y del rendimiento inconsistente ha dado como resultado la desconfianza para los investigadores y profesionales en aceptar este tipo de modificación, por lo cual se inclinan por el proceso por vía húmeda, a pesar de que tiene el potencial para reciclar más polvo de GCR.



Figura 7: Proceso de modificación por la vía seca.

Fuente: <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>

En este proceso de aplicación como se observa en la **Figura 7**, se encuentra el GCR sustituyendo una parte muy pequeña de los agregados (entre el uno (1) y el tres (3) por ciento del peso total de los agregados). Esta aplicación ocurre en el momento antes de agregar el cemento asfáltico en la mezcla, justo cuando los agregados alcanzan una temperatura específica. En este proceso de aplicación no se necesita ningún equipo especial para poder realizar la mezcla ya que el GCR entra a mezclarse con los agregados de manera directa. En algunos casos las partes más diminutas del GCR entran a modificar el cemento asfáltico

Existen varias tecnologías utilizadas para el proceso por vía seca, que son las siguientes: tecnología PlusRide, tecnología Genérica y tecnología Convencional.

7.6.2.1 Tecnología PlusRide.

En esta tecnología, el GCR es agregado en la mezcla asfáltica en proporciones de uno (1) a tres (3) por ciento del peso total de los agregados. El GCR son partículas que van desde 4.2 mm (1/4") a 2.0 mm (tamiz No. 10). El contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica debe estar entre el 2 y el 4 por ciento, y por lo general son obtenidos con contenidos de ligante entre el 7.5 y el 9 por ciento.

7.6.2.2 Tecnología Genérica.

En esta tecnología el GCR se emplea en dos fracciones, una fracción gruesa y una fina con el fin de emparejar la granulometría de los agregados obteniendo una mezcla asfáltica mejorada. La parte fina del GCR es utilizada para interactuar con el cemento asfáltico mientras que la parte gruesa entra a comportarse como un agregado elástico en la mezcla asfáltica

7.6.2.3 Tecnología Convencional.

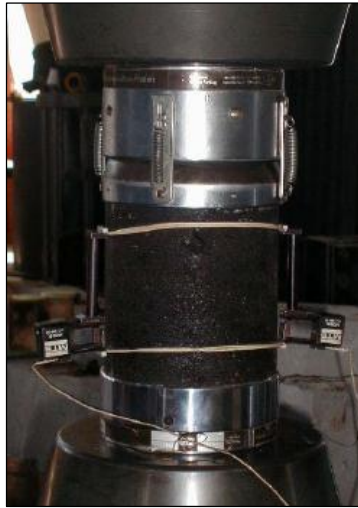
En esta tecnología no se requiere grandes cantidades de cemento asfáltico, pero a su vez la cantidad necesaria de caucho para obtener resultados favorables, ésta cantidad es aproximadamente el dos por ciento (2%) del peso total de los agregados. Sus resultados favorables para la aplicación por esta vía (Vía Seca) fueron aprobados gracias a pruebas dinámicas de laboratorio.

7.7 Módulo Dinámico.

Los módulos dinámicos son el valor absoluto del módulo complejo, que define la elasticidad de un material de viscosidad lineal sometido a una carga. Especificando la relación entre esfuerzo y deformación.

En este ensayo se somete la probeta de cemento asfáltico de 15 cm de diámetro y una altura que varía entre 15 y 20 cm, a una compresión axial inconfínada. A esta probeta se le aplican una serie de cargas a diferentes frecuencias (1, 4, 10 y 16 Hz), variando la temperatura (5 °C, 25 °C y 40°C).

El resultado de esta aplicación de cargas a diferentes frecuencias y temperaturas, es un esfuerzo axial y una deformación unitaria recuperable. Donde la relación de estos dos es el Modulo dinámico.



**Ilustración 1: MTS para Módulos Dinámicos.
IDU-ANDES (2005)**

7.8 Deformación Permanente.

Es utilizado principalmente para analizar el ahuellamiento y la deformación permanente de las mezclas asfálticas.

Este ensayo consiste en un movimiento lineal de una rueda de caucho solida de 20 mm de espesor y 50 mm de ancho. Este movimiento tiene una frecuencia de 42 pasadas por minuto y una presión de contacto de 900 KN/m². La deformación producida por esta rueda hacia la muestra es medida a diferentes intervalos de tiempo durante dos (2) horas. Además manejan una temperatura controlada de 60 °C (Algo muy alejado a la realidad cuando se habla de temperaturas controladas).

La muestra se caracteriza por unas dimensiones de 30x30 cm y un espesor de 5cm.

El equipo utilizado se muestra en la **Ilustración 2**.



**Ilustración 2: Equipo para el ensayo de Deformación Permanente.
IDU-ANDES. (2005)**

7.9 Ahuellamiento

El ahuellamiento se deriva de una deformación permanente en cualquiera de las capas del pavimento o la sub-rasante, usualmente producida por consolidación o movimiento lateral de los materiales debidos a la carga del tránsito. Las causas del ahuellamiento pueden ser: Diseño inadecuado de la mezcla asfáltica, exceso de asfalto, ligante muy blando, compactación inadecuada durante la construcción o abrasión por las ruedas. Un ahuellamiento significativo puede provocar mayores fallas estructurales.

La prueba de deformación plástica se realiza con un equipo de origen Británico, según indicaciones dadas en la norma INV. E-756 “Resistencia A La Deformación Plástica De Las Mezclas Asfálticas Mediante La Pista De Ensayo De Laboratorio”. El equipo consta de una cabina controlada para mantener una temperatura constante de 60 ± 1 °C; sobre las muestras fabricadas se ejerce una presión de 900kN/m² mediante el paso de una rueda de caucho en un número total de 5040 veces.

7.10 Fatiga.

Dentro de las fallas estructurales que sufre un pavimento se encuentran los fenómenos por fatiga, los cuales principalmente son generados por efectos del tránsito. Las fallas estructurales que sufre un pavimento se presentan generalmente cuando los materiales que conforman la estructura sufren un

agrietamiento con deformación por tracción en la base de la carpeta asfáltica al ser sometidos a repeticiones de carga por la acción del tránsito.

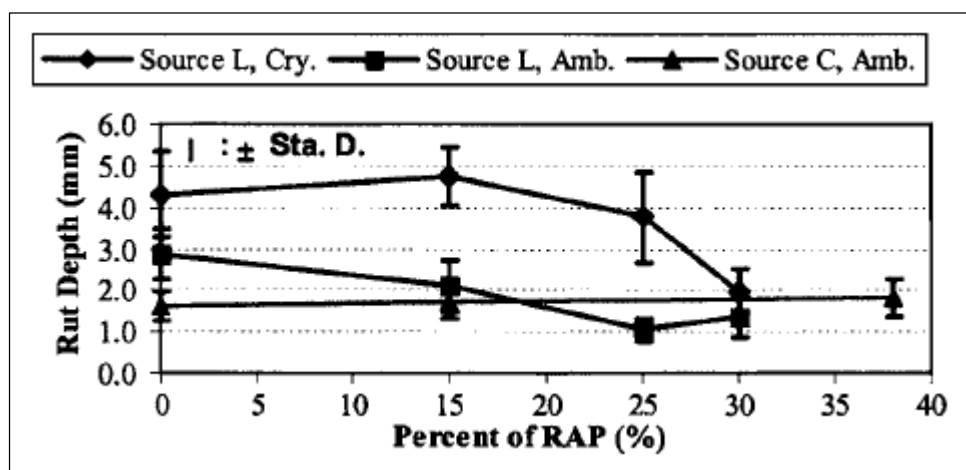
La fatiga se presenta cuando los materiales que conforman el cemento asfáltico sufren un agrietamiento estructural el cuál se relaciona con la deformación de la base de cada capa. Estos fenómenos que se producen en el pavimento durante su funcionamiento, son los que se evalúan en laboratorio mediante los llamados ensayos de fatiga; el agrietamiento que se produce en los materiales cuando se hacen las pruebas de laboratorio sobre las muestras de materiales, se asocia con la respuesta recuperable del pavimento ante las cargas dinámicas. (**Carreño y Reyes. 2015**)

8 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Se dividió este capítulo en diferentes investigaciones que relacionan el efecto del GCR en las mezclas asfálticas. Partiendo desde el momento de la obtención del GCR, luego la adición, el efecto según el tamaño, la forma y porcentaje de GCR, el contenido de vacíos en la mezcla, y por último, el efecto del GCR en los procesos constructivos.

8.1 Según los procesos de obtención del GCR

Según una serie de ensayos, **Xiao (2007)** encontró que el método de obtención del GCR (método ambiental y criogénico) influye en el comportamiento ante el fenómeno de fatiga en una mezcla asfáltica. Llegó a la conclusión que, cuando se modifica el cemento asfáltico con GCR producto del método ambiental, se mejora esta capacidad de resistencia al ahuellamiento con respecto a un cemento asfáltico modificado con GCR producto del método criogénico. Tal como muestra la **Gráfica 2**, donde se evalúa la profundidad de la huella (eje y) y el porcentaje de RAP (Asfalto reciclado) (eje x) dependiendo estos dos factores del tipo de granulometría. El RAP en este caso hizo parte del contenido de agregados en la mezcla y el porcentaje de GCR fue del 10% del cemento asfáltico con un tamaño equivalente a la abertura del tamiz 40 (0,425 mm).



Gráfica 2: Profundidad de la huella vs Porcentaje de RAP.
Xiao (2007)

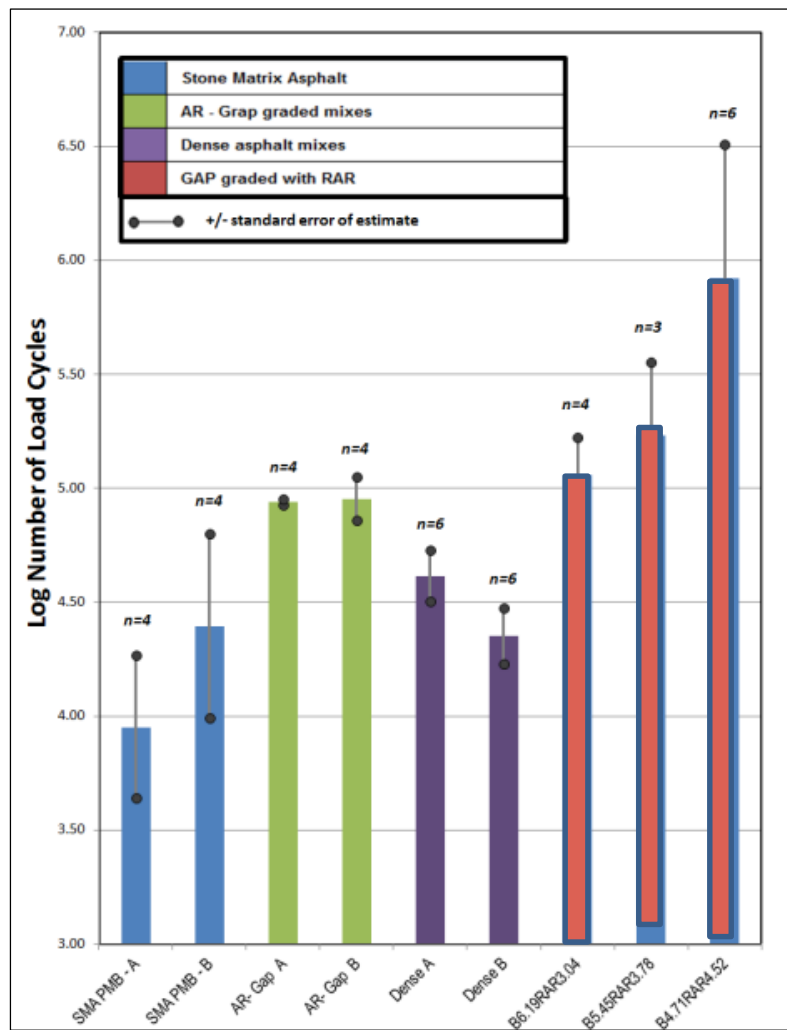
8.2 Según los métodos de adición del GCR.

En general, la literatura de referencia reporta que por vía húmeda las desventajas, entre otras, son el mayor costo inicial de la mezcla (se requiere nuevos equipos en planta como la unidad de mezclado y almacenamiento del asfalto-caucho, cambio de bombas y tuberías) y el aumento de la temperatura de mezclado (se requiere energía adicional en planta durante el proceso de fabricación de la mezcla). Por vía seca el tiempo de compactación de la mezcla es mayor y demanda mayor cantidad de ligante asfáltico. Sin embargo, el proceso seco es más económico que el húmedo (**Velar, 1997**) por razones antes mencionadas.

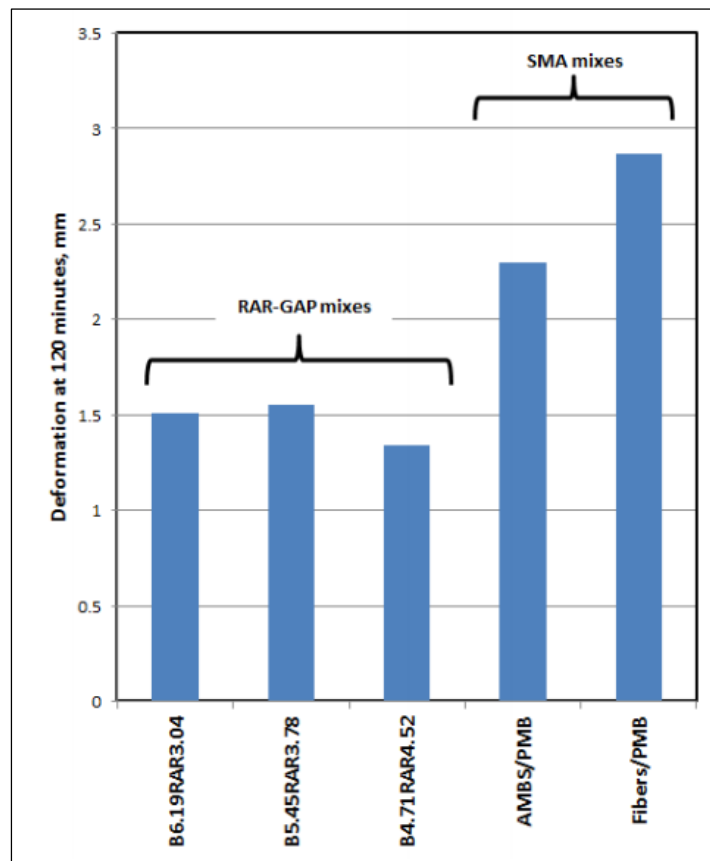
De acuerdo con **Lougheed y Papagiannakis (1998)**, el mejor comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas se obtiene cuando el proceso de modificación se realiza por vía húmeda. Por medio del proceso en seco el comportamiento de las mezclas varía entre aceptable a desastroso.

Ante los altos costos de producción de las mezclas asfálticas modificadas con GCR **Sousa (2012)** expone un nuevo método de adición llamado “caucho activado y reaccionado” (RAR), es una mezcla en caliente conformada por cemento asfáltico convencional, GCR y un cemento asfáltico estabilizador mineral activado. Esta mezcla permite su producción en plantas convencionales, con un alimentador de material particulado. Además requiere temperaturas menores en tiempos de agitación menores, a temperaturas similares de las que se requieren para un pavimento convencional ya que su viscosidad disminuye y los contenidos de asfalto pueden disminuir hasta en un 50% del óptimo (completando el otro 50% con RAR).

Además de las mejoras en los procesos de producción de las mezclas asfálticas modificadas se realizaron ensayos de Fatiga (ASSHTO T321) y de Deformación permanente a temperaturas altas (alrededor de 60°C para ver el comportamiento similar en climas muy cálidos) y establecer también las mejoras mecánicas que este tiene en las mezclas asfálticas.



Gráfica 3: Ensayo de Fatiga.
Sousa (2012)



Gráfica 4: Deformación permanente.
Sousa (2012)

Los resultados que obtuvo en la **Gráfica 3**, demuestra que las mezclas asfálticas modificadas con RAR (barras rojas), resisten un número mayor de ciclo de cargas sin que este tenga daños por fatiga con respecto a las demás (modificadas normalmente o convencionales). En la **Gráfica 4** de igual manera se observa que resulta más resistente a las deformaciones plásticas las mezclas asfálticas modificada con RAR (barras “RAR-GAP mixes”) con respecto a mezclas modificadas con polímeros.

Estos adelantos tecnológicos resultan interesantes, ya que además de mejorar aún más los comportamientos mecánicos con respecto a las mezclas modificadas con GCR (sin RAR) (barras verdes) como se muestra en la **Gráfica 3**, se disminuyen costos iniciales en los procesos de producción de la mezcla asfáltica modificada y en la construcción.

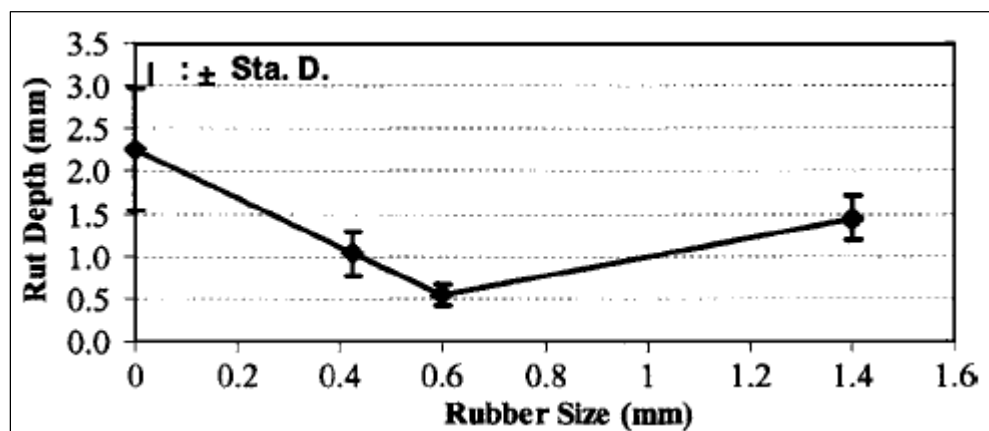
Por otro lado **Moreno (2012)** demostró el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica con proporción de GCR en los agregados (en forma de polvo).

Llegando a la conclusión de que cuando se agregan porcentajes entre el 0.5% y el 1.0% del peso total de la mezcla a una reacción de 45 min, la mezcla asfáltica mejora su comportamiento ante deformaciones plásticas.

Dias (2014) resalta las ventajas de mejorar el pavimento por vía seca, donde expone que la resistencia a la fatiga y al ahuellamiento aumenta cuando la reacción entre la mezcla y el GCR no supera los 175°C. Estos resultados se compararon con mezclas convencionales y mezclas modificadas por vía húmeda, donde resalta que los resultados son los mismos que en la vía seca, **Xie (2016)**.

8.3 Según el tamaño y la forma del GCR

Xiao (2007) ensayó mezclas asfálticas modificadas con GCR, variando el tamaño del GCR y encontró que el mejor comportamiento ante fenómenos de ahuellamiento se da cuando las partículas de GCR son de un tamaño de 0,6 mm (para un tamaño de la huella de 0,5 mm aproximadamente), tal como muestra la **Gráfica 5**.



Gráfica 5: Profundidad de la huella vs tamaño del GCR.
Xiao (2007)

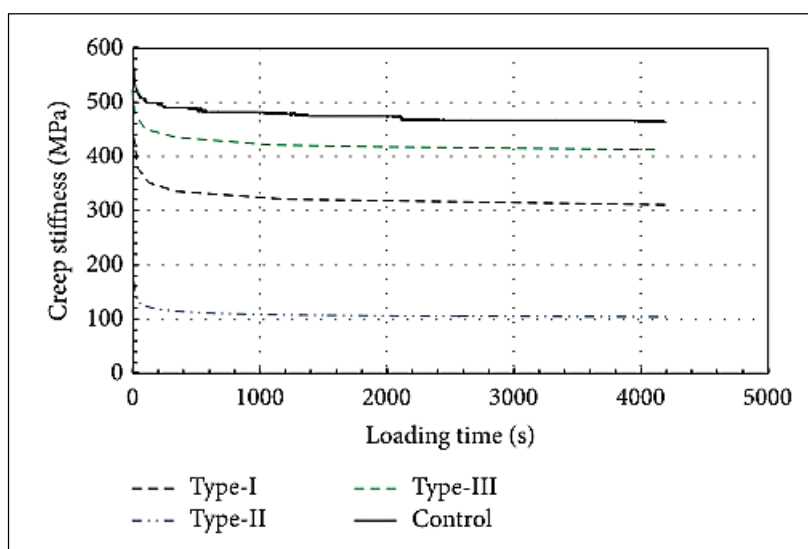
Murat (2015) dice que el tamaño y la forma del GCR afecta la resistencia a la tensión de una mezcla asfáltica. En la **Gráfica 6** y en la **Gráfica 7** se muestra este comportamiento, donde se estudiaron 4 tipos de mezclas asfálticas, la de control (mezcla asfáltica convencional), la Tipo I y la Tipo III tienen forma de grano, siendo la Tipo I más grande que la Tipo III (tamaño equivalente al tamiz 40) y la Tipo II tiene forma de tiras.

La **Gráfica 6** se observa que la resistencia a la tensión que tienen las muestras con diferentes contenidos de GCR es menor con respecto a una con mezcla convencional; sin embargo el mejor comportamiento de los tres tipos diferentes de GCR se obtiene con un tamaño diminuto y forma de polvo (Tipo III, **Ilustración 3**).

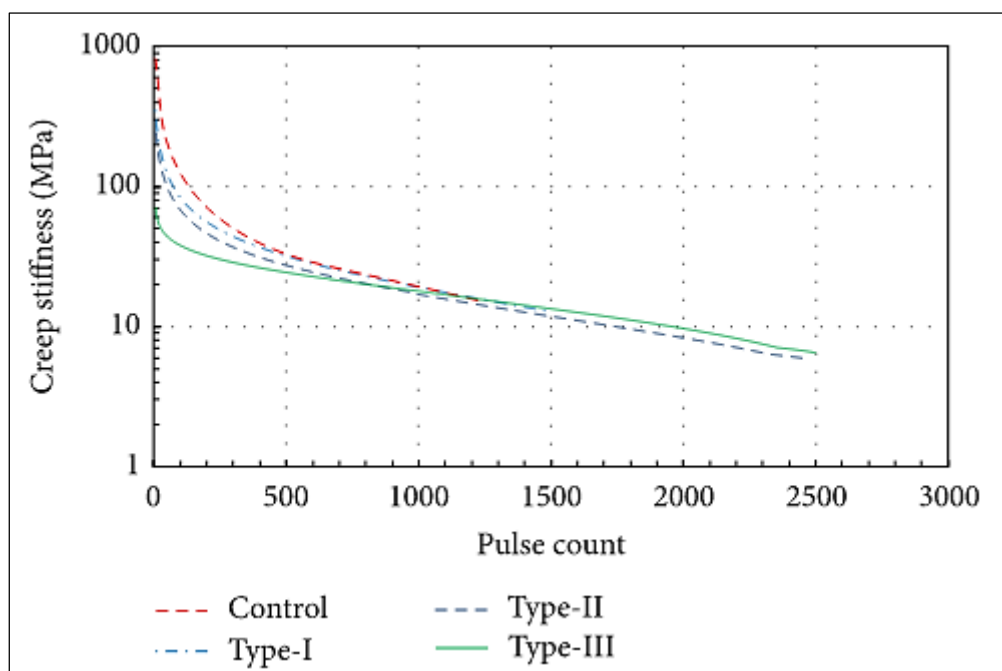
Por otro lado, cuando se aplican cargas repetitivas, las muestras que tienen contenido de GCR resisten una tensión mayor, con respecto a la de control; sin embargo la mezcla con GCR Tipo III, resiste a un número mayor de cargas como se muestra en la **Gráfica 7**.



Ilustración 3: Caucho Reciclado Tipo III.
Murat (2015).



Gráfica 6: Resistencia a la tensión vs Tiempo de aplicación de carga.
Murat (2015).



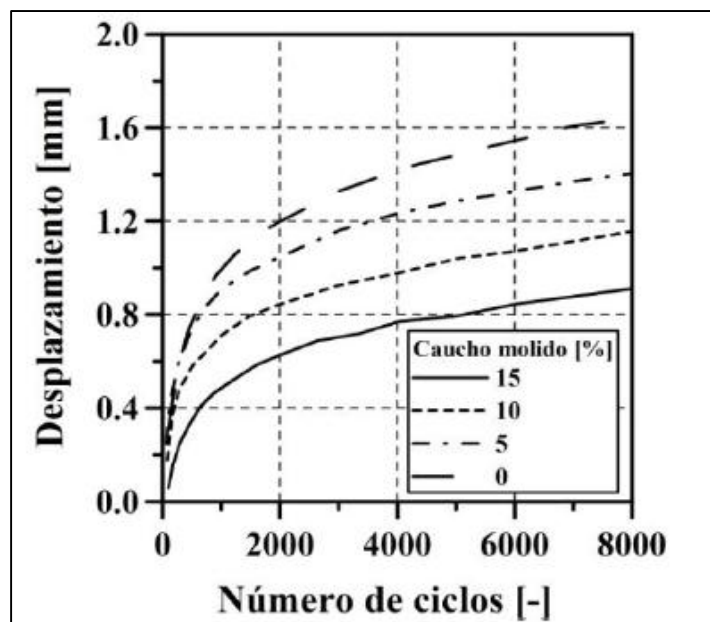
Gráfica 7: Resistencia a la Tensión vs ciclos de carga.
Murat (2015).

Este comportamiento que se muestra en la **Gráfica 7**, resulta óptimo para una aplicación en vías de gran flujo vehicular, donde tenemos grandes cargas repetitivas pasando por el pavimento, resistiendo un periodo más alto y disminuyendo costos de mantenimiento, posibles cierres en las vías, falta de seguridad y flujo por baches (huecos) en las vías, etc.

Se observa que **Xiao (2007)** recomienda un tamaño de 0,2 mm mayor que **Murat (2015)**, teniendo en cuenta que los datos de la **Gráfica 7** muestran las mejoras en la resistencia al ahuellamiento, se tendría que encontrar una relación con la profundidad de la huella para comparar con los estudios de **Xiao (2007)** y establecer si hay una diferencia considerable, para optar por utilizar un tamaño de partícula más diminuta. Por otro lado hay que tener en cuenta que los costos de obtención del GCR aumentan a medida que el tamaño disminuye, se necesitan procesos y maquinaria más especializada.

8.4 Según el porcentaje de GCR en la mezcla asfáltica

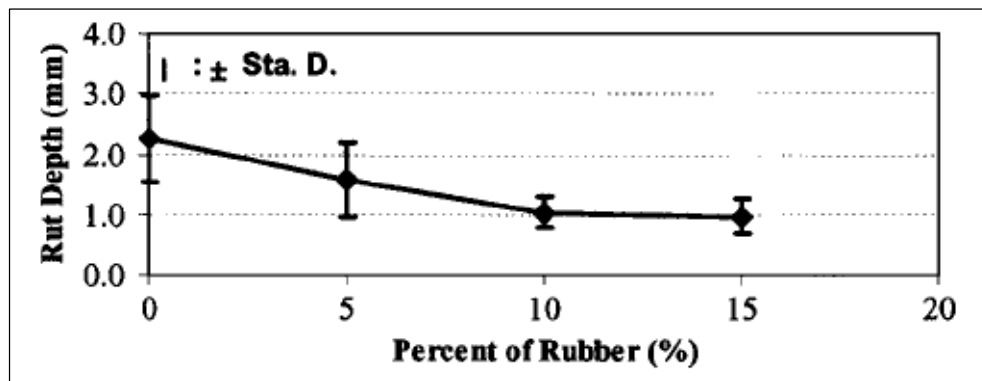
Se observa en la **Gráfica 8** un incremento en la resistencia a la deformación permanente cuando se aumenta entre 5-15% el contenido de caucho molido a la mezcla (GCR), **Shen (2006)**.



Gráfica 8: Resistencia a la Deformación permanente.
Shen (2006)

Además un estudio realizado por el IDU y Universidad de Los Andes (2002) concluye que el grado de desempeño (PG por sus siglas en inglés) de los CA's colombianos de Apiay y Barrancabermeja incrementaron desde PG 58-22 a PG 88-16 y PG 58-16 a PG 76-22 cuando se adicionó 13% y 15% de GCR respectivamente con respecto al peso del Cemento Asfáltico.

Xiao (2007) demuestra que la profundidad de la huella disminuye cuando el porcentaje de GCR aumenta en la mezcla asfáltica, tal y como se muestra en la **Gráfica 9**.



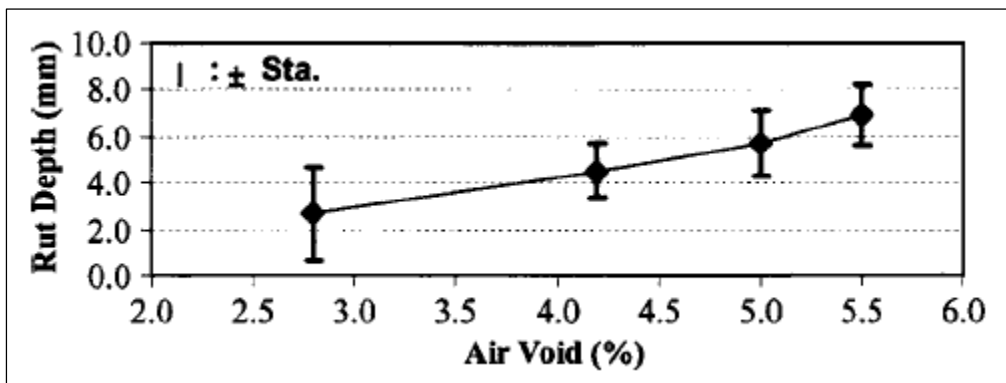
Gráfica 9: Profundidad de la huella vs porcentaje de GCR.
Xiao (2007)

Way (2016) dice que una mezcla asfáltica modificada con GCR, tiene mayor resistencia al agrietamiento, disminución de la cantidad de asfalto en las mezclas y en el espesor de la capa de asfalto, disminución en los costos de los proyectos y mantenimientos, mejoras en la seguridad vial y disminución de ruido, con respecto de una mezcla convencional, cuando el GCR se encuentra en una proporción entre máximo 25 % y mínimo 15% del cemento asfáltico (al igual que **Lee 2007**). Siendo más específicos 16,7 % del total de la mezcla o 25% del peso del cemento asfáltico.

Jimenez y Meier (1985) dice que al adicionar 5% de GCR del peso total de la mezcla asfáltica, esta duplica su resistencia a la fatiga con respecto a una mezcla convencional. Por otro lado **Punith (2011)** dice que agregando 5,3% de GCR de los agregados (vía seca) a la mezcla asfáltica, esta se vuelve más resistente a la fatiga y al ahuellamiento que una mezcla convencional (Al igual que **Hsu 2011**).

8.5 Según el contenido de vacíos de aire en la mezcla asfáltica

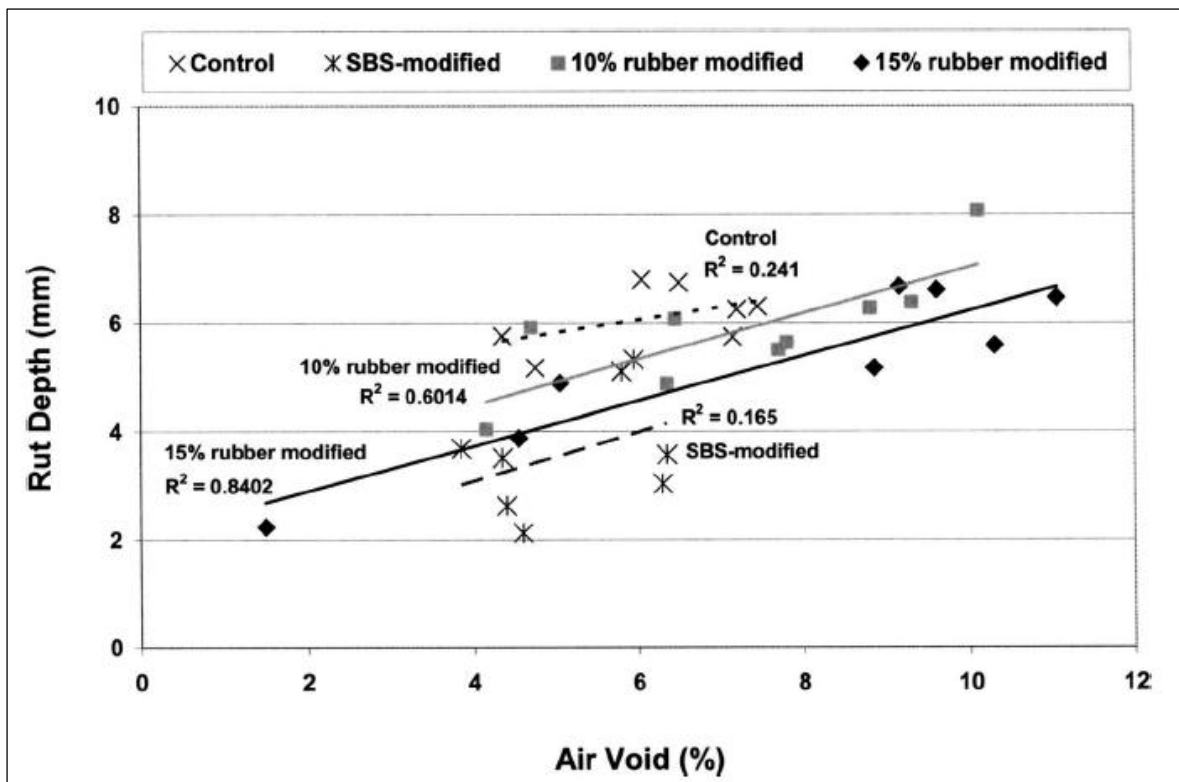
Cuando el porcentaje de vacíos de aire en una mezcla asfáltica aumenta, la profundidad de la huella aumenta; dado esto, **Xiao (2007)** agregó a la mezcla asfáltica 10% de GCR con un tamaño equivalente a la abertura del tamiz 40 y encontró que el porcentaje de vacíos de aire y la profundidad de la huella disminuyen (**Gráfica 10**) a comparación de una mezcla asfáltica sin GCR.



Gráfica 10: Profundidad de la huella vs porcentaje de vacíos de aire.
Xiao (2007)

Lee (2007) demostró que la cantidad óptima de GCR en la mezcla asfáltica para alcanzar un porcentaje de vacíos de aire menor que el de una mezcla asfáltica sin GCR es de 15%, obteniendo así un comportamiento mejor ante el ahuellamiento, tal como se muestra en la **Gráfica 11** donde se comparan 4 tipos de mezclas asfálticas, una de control (sin GCR), una modificada con SBS (caucho natural), una con 10% de GCR y otra con 15% de GCR.

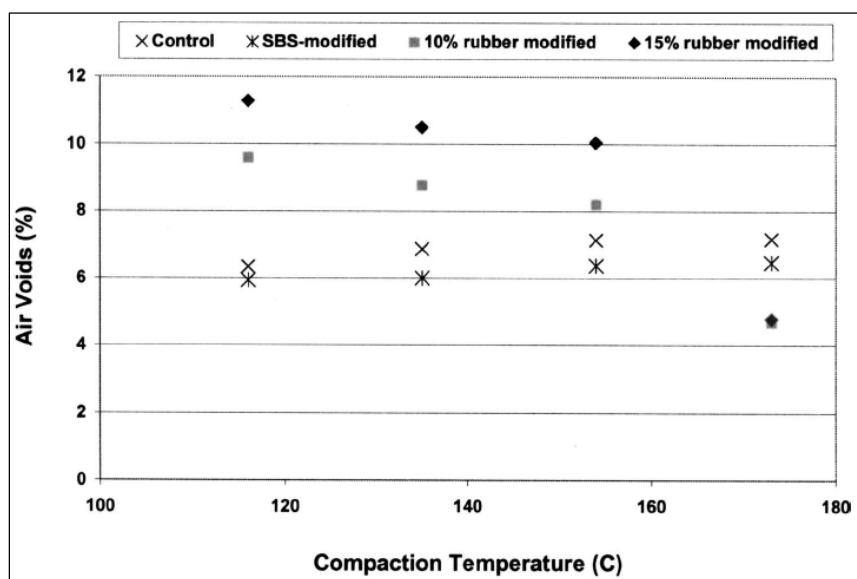
También se observa que a pesar que cuando se modifica la mezcla asfáltica con 15 % de GCR, el mejor comportamientos se obtiene cuando se modifica con caucho natural (SBS); sin embargo la producción de este agente modificador, resulta más costosa e impacta aún más el medio ambiente (este material se extrae directamente de las plantas de caucho mediante procesos previos y no se le da un uso adicional como es el caso del GCR)



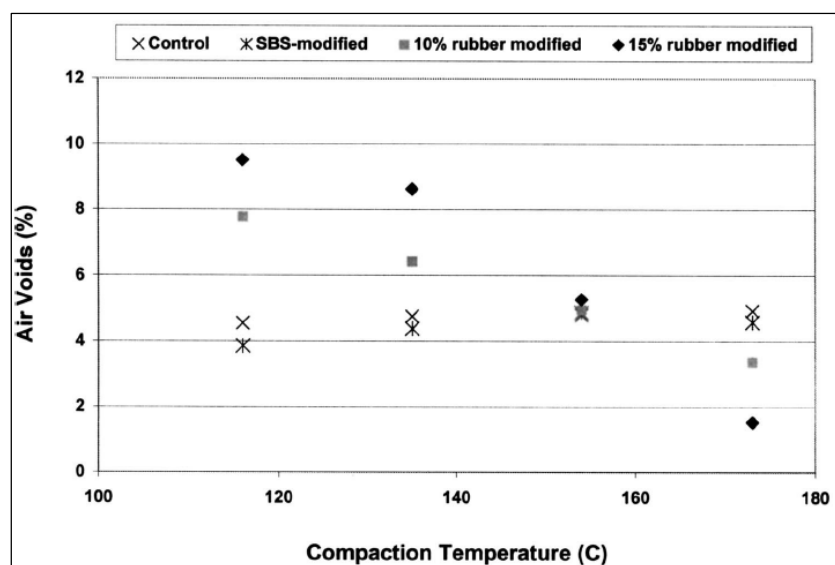
Gráfica 11: Profundidad de la huella vs porcentaje de vacíos.
Lee (2007)

8.6 Según los procesos constructivos

Lee (2007) demuestra que con presencia de GCR, aumento de la temperatura de compactación y aumento de los niveles de compactación, los porcentajes de vacíos de aire en la mezcla asfáltica disminuyen y por ende la profundidad de la huella también. En la **Gráfica 12** se ensayaron muestras a diferentes temperaturas, diferentes modificadores, diferentes porcentajes de GCR (cuando es el caso) y un nivel de compactación menor que en la **Gráfica 13** (donde manejó iguales diseños de mezcla y temperaturas que en la **Gráfica 12**).



Gráfica 12: Porcentaje de vacíos vs temperatura de compactación.
Lee (2007)



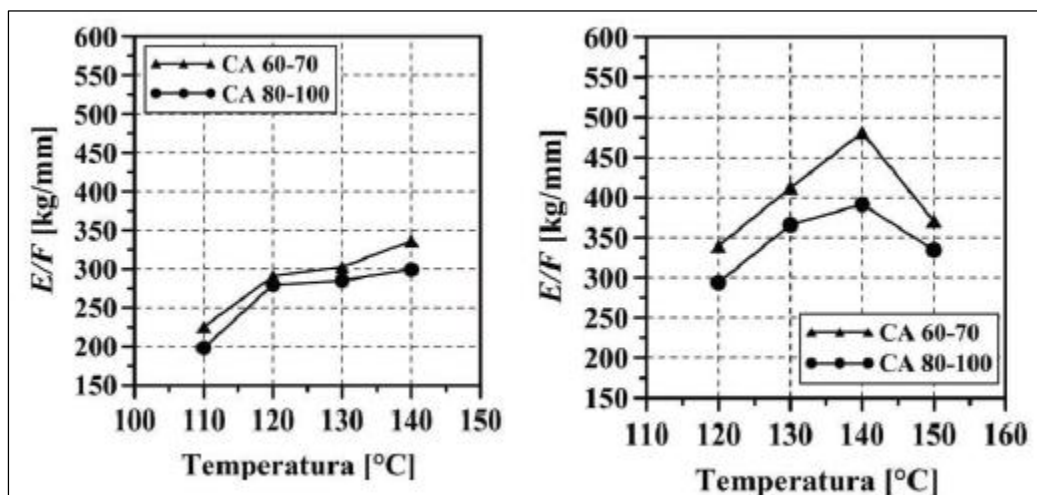
Gráfica 13: Porcentaje de vacíos vs temperatura de compactación.
Lee (2007)

Gracias a los estudios anteriores, **Lee (2007)** encontró que con un contenido de 15% de GCR en la mezcla y aumentando los niveles de compactación que los requeridos en una mezcla convencional, se pueden construir pavimentos con temperaturas similares a las de los pavimentos convencionales (155°C), sin sufrir

problemas de ahuellamiento prematuros. Está mejora refleja además una disminución en costos ya que se requiere menos energía para mantener la mezcla asfáltica modificada con GCR a temperaturas elevadas a las requeridas en mezclas asfálticas convencionales.

Rondón (2012), evaluó la influencia de la temperatura de compactación en la resistencia mecánica de las mezclas asfálticas modificadas con GCR ante cargas estáticas. Gracias a las condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá, esta temperatura disminuye aproximadamente 30°C con respecto a la óptima. Ensayando mezclas modificadas con GCR, estas afectaciones en la resistencia mecánica disminuyen con respecto a las de una mezcla asfáltica convencional. Además encontró que la temperatura óptima de compactación es de 140°C, para cualquier diseño de mezcla.

En la **Gráfica 14** se muestra la diferencia de magnitudes cuando hay GCR (parte derecha) y cuando no hay (parte izquierda), siendo notoria la mejora en la resistencia mecánica cuando el GCR es adicionado a la mezcla.



Gráfica 14: Resistencia Mecánica vs Temperatura de Compactación.
Rondón (2012).

Way (2016) recomienda que la temperatura de producción de las mezclas asfálticas modificadas con GCR debe ser la siguiente:

- Temperatura del cemento asfáltico: 163° - 191°C.
- Temperatura del agregado: <177°C.

estima en unos 1553 neumáticos por km/carril para una capa de 5 cm de espesor de mezcla modificada con GCR. **Rubber & Plastic News (1998)** dice que un promedio de utilización de llantas de 13.6 ton para un km de vía pavimentada con mezclas asfálticas modificadas con GCR.

9 CASOS INTERNACIONALES DE APLICACIÓN EXITOSOS

Desde la invención de McDonald, la tecnología de proceso húmedo se ha utilizado y modificado más ampliamente en cuatro estados en los EE.UU.: Arizona, California, Texas y Florida. Más recientemente el proceso húmedo se ha utilizado también en Carolina del Sur, Nevada y Nuevo México. La preferencia por el uso de este modificador particular era debido al hecho de que no sólo la utilización de las llantas usadas puede ayudar a resolver los problemas ambientales sino que también ofrece otros beneficios como el aumento de la resistencia al deslizamiento, la mejora de la flexibilidad y la resistencia al agrietamiento, y reduce el ruido del tráfico

Sudáfrica y Australia comenzaron a introducir el asfalto modificado con GCR como cemento asfáltico para pavimentos y para los sellos de la década de 1980 y mediados de la década de 1970, respectivamente. “En Sudáfrica, se informó de los procesos tanto húmedos y secos que se han utilizado con éxito” Visser⁸(2000). “Dos estados de Australia (Nueva Gales del Sur y Victoria) adoptaron el procedimiento por vía húmeda para la aplicación limitada de asfalto modificado con GCR, principalmente como capa de resistencia a la grieta, pero por lo demás su uso ha sido predominantemente para aplicaciones de sellado pulverizados” Widyatmoko (2007).

En Europa el asfalto modificado con GCR por vía húmeda ha sido utilizado con éxito en la aplicación de construcción de carreteras desde 1981 en Bélgica, así como en Francia, Austria, Países Bajos, Polonia y Alemania, Souza (2005), más recientemente, también en Grecia, Mavridou (2010) y Reino Unido Hicks (2010), pero los países con un mayor número de aplicaciones son Portugal Antunes (2000), España Gallego (2000), Italia, Santagata (2007), República Checa Dasek (2012) y Suecia Nordgren (2012).

Hoy en día la tecnología de asfalto de goma está siendo adoptado en muchas otras partes del mundo: Según lo informado por Widyatmoko y Elliot, se informó de

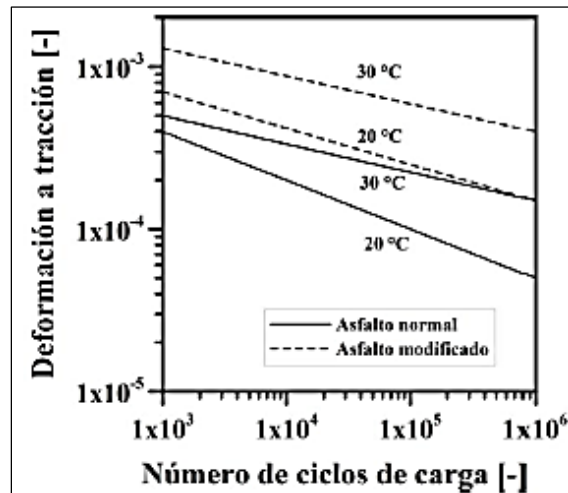
Taiwan que ha adoptado el Arizona DOT brecha mejore, y open-graded mezclas asfálticas tipo goma para la rehabilitación de pavimento flexible; Por otra parte, el asfalto revestidos de caucho ha sido puesto a prueba en Beijing y para su uso en los nuevos y los trabajos de mantenimiento como parte de la preparación para los Juegos Olímpicos de 2008 en China y también se ha utilizado en Ecoparque Proyecto en Hong Kong. Sobre la base de las primeras experiencias positivas también Brasil Pinto (2012) y Sudán Nourelhuda (2012) están invirtiendo fuertemente en la aplicación de esta tecnología para pavimentos de carreteras.

10 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

10.1 Ventajas

A continuación se enumerarán una serie de ventajas relevantes que sustentan la importancia de la utilización de pavimentos con presencia de GCR:

- Mezclas más resistentes a los fenómenos de fatiga, ahuellamiento (**Khodary, 2010; Dong y Tan, 2011; Hsu, 2011; Punith et al., 2011**).
- Según **Jimenez y Meier (1985)**, al adicionar 5% de GCR a la mezcla asfáltica en peso, su vida útil en términos de fatiga, se duplica con respecto de una convencional.
- **Sibal (2000)** ensayó mezclas asfálticas con GCR por vía seca y encontró que la resistencia a la fatiga es mayor a diferentes temperaturas, con respecto a una mezcla asfáltica convencional, tal y como se muestra en la **Gráfica 15**



Gráfica 15: Ley de fatiga de mezclas asfálticas con GCR por vía seca.

- **Holleran y Van (2000)** dicen que este tipo de mezclas modificadas disminuyen el espesor del pavimento.
- Aumenta la resistencia al envejecimiento y oxidación del ligante asfáltico (**Punith, 2011**).
- Aumenta la resistencia de la mezcla al agrietamiento por bajas temperaturas (**Khodary, 2010**).
- La mezcla asfalto-caucho es más flexible a bajas temperaturas y a altas temperaturas es menos plástica, es decir, es menos susceptible a los cambios de temperatura (Dong y Tan, 2011). Un estudio realizado por el IDU y Universidad de Los Andes (2002) concluye que el grado de desempeño (PG por sus siglas en inglés) de los CA's colombianos de Apiay y Barrancabermeja incrementaron desde PG 58-22 a PG 88-16 y PG 58-16 a PG 76-22 cuando se adicionó 13% y 15% de Gcr respectivamente con respecto al peso del CA.
- Aumenta la resistencia a la humedad (**Punith, 2011**).
- Ligante asfáltico más resistente al calor y al sobrecalentamiento debido al proceso de vulcanización de la llanta (IDU y Universidad de Los Andes, 2002, 2005).
- Aumento de la elasticidad del ligante (**Khodary, 2010**).
- Mayor resistencia al desgaste por abrasión, medido principalmente sobre mezclas porosas, abiertas y/o drenantes (**Punith et al., 2011**).
- Disminuye el ruido de rodadura (**Wang et al., 2009**). La disminución promedio de ruido reportada en diversos estudios es de aproximadamente 4 a 10 decibeles.

- Mejoras las propiedades reológicas del asfalto (**Punith et al., 2011**). Estas mejoras se traducen en un ligante asfáltico con mayor rigidez (módulo viscoelástico) y menor ángulo de fase (comportamiento elástico).
- Mezclas más durables y por lo tanto con menor necesidad de mantenimiento (IDU y Universidad de Los Andes, 2002; Lee et al., 2008). De acuerdo con IDU y Universidad de Los Andes (2005), el empleo del GCR incrementa la vida útil de un pavimento. Ellos reportan que para el proceso por vía seca, en el diseño de una mezcla tipo MDC-2 (INVIAS, 2007) con una probabilidad de falla del 50% la vida útil se incrementó en 58% para contenidos de GCR de 1%, y 232% con 2% de GCR. De acuerdo con ese mismo estudio, la vida útil que se logra en un pavimento haciendo uso del proceso húmedo es superior a la obtenida mediante el proceso por vía seca. **Schnormeier (1992)** concluye que la durabilidad del asfalto-Gcr es dos a tres veces mayor que el convencional.
- Ayuda a disminuir el impacto ambiental negativo que producen las llantas usadas (**Xiao y Amirkhanian, 2009**).
- Mejora la resistencia al deslizamiento (**Xiao, 2009**).

10.2 Desventajas

A pesar de haber una gran cantidad de ventajas que hacen que estos procesos sean atractivos y de gran funcionalidad, existen ciertas desventajas que merecen ser estudiadas a fondo, ya que de una u otra manera generan una problemática al implementar pavimentos con presencia de GCR; estas son:

- El incremento de la viscosidad genera un aumento en la temperatura de fabricación en planta y extensión en obra de la mezcla asfáltica modificada lo que genera una mayor dificultad y complejidad a la hora de construirla in situ (Bahía y Daves, 1994). En planta, la modificación del CA con el GCR se realiza a temperaturas entre 180-200°C lo que genera la necesidad de mayor energía para la fabricación de la mezcla (Dong y Tan, 2011). Adicionalmente se requiere de equipo especial para mezclar el asfalto con el GCR y almacenarlo, lo que incrementa el costo inicial de la mezcla. De acuerdo con Loughheed y Papagiannakis (1998) este incremento del costo inicial de la mezcla modificada puede oscilar entre 40 y 80% con respecto a aquella que utiliza un ligante tradicional. Según Rubber & Plastic News (1998b), el costo del asfalto-caucho es aproximadamente el doble del convencional y el IDU y la Universidad de Los Andes (2002) estimaron un incremento en el precio unitario de la

mezcla convencional entre el 26% y 42% cuando se modifica la mezcla con GCR por vía seca.

11 Recomendaciones

- La maquinaria para la construcción de pavimentos con presencia de GCR, requiere una limpieza especial ya que los residuos del material tiende a quedar pegado. Esta limpieza debe ser repetitiva y más exhaustiva que con un pavimento convencional.
- Es pertinente mantener un seguimiento de la mezcla asfáltica y de todos los componentes de la estructura del pavimento. Para ello es necesario tomar muestras del material para analizar sus comportamientos en laboratorio, para comprobar que sus parámetros cumplan antes y después de la construcción. Se debe analizar el rendimiento de la deformación permanente, la fatiga, la resistencia a la figuración por temperatura en la compactación.
- Es importante el seguimiento y control en la producción de estas mezclas, con el fin de agregar las cantidades optimas de agregados, de cemento asfáltico y de GCR. Esto con el fin de reducir costos innecesarios y alcanzar una calidad esperada para los requerimientos del proyecto en particular.
- Incentivar la investigación para el aumento de la documentación para los análisis de costos a largo plazo y estándares más claros y aplicables a diferentes zonas del país, donde varía la temperatura, el tráfico en circulación, geometría y clima.
- En muchos análisis, se observó que los valores mecánicos disminuían con respecto a un pavimento convencional. Sin embargo es importante analizar las causas de estas disminuciones, que en la mayoría de los casos se da por la configuración de los husos granulométricos. Dado este problema es necesario encontrar esta armonía para estar en valores de cantidad de vacíos y viscosidad óptimos.

12 Conclusiones

- En la mayoría de estudios que se han realizado a pavimentos con GCR, se refleja que hay otros factores que afectan los comportamientos mecánicos. Estos factores tienen que ver con la temperatura de reacción del asfalto y el GCR, la granulometría de los agregados, la adición de aditivos y la implementación de otras técnicas de reciclaje de pavimentos.
- Los diferentes estudios encontrados en la revisión del estado del arte, demuestran que la adición del GCR a las mezclas asfálticas, independientemente del proceso (proceso seco o húmedo) mejora considerablemente los comportamientos mecánicos de los pavimentos.
- Sin recurrir a análisis exhaustivos de costos, se puede apreciar que los beneficios monetarios son notorios, partiendo del hecho del aumento de la vida útil de los pavimentos (lo que implica reducción de mantenimientos por fallas mecánicas), la sustitución de materiales (como es el caso del contenido de los finos por materiales reciclables (que en este caso es el GCR), entre otros. Sin embargo, estos ahorros son reflejados a largo plazo.
- El GCR presente en las mezclas asfálticas, mejora los problemas de ahuellamiento, disminuyendo los contenidos de vacíos de aire en las mezclas asfálticas acompañados de un proceso más intensificado de compactación la mezcla. Inicialmente, en los estudios encontrados, se refleja que el problema del ahuellamiento, entre otros factores, se ve favorecido por la falta de compactación, por lo cual la solución esperada es aumentar los ciclos, sin embargo, se demostró que al adicionar GCR estos ciclos pueden disminuir, ya que las partículas de caucho reciclado mejoran esta característica, con respecto de una mezcla asfáltica convencional.
- La información disponible sobre este método de mejoramiento de las mezclas asfálticas demuestra los altos avances internacionales, en cuanto a métodos de adición, porcentajes óptimos, solución viscosidades altas (que genera la adición de GCR), mejoras mecánicas en la mezcla

asfáltica, solución de problemas de agrietamiento, ahuellamiento y resistencia a la fatiga.

- La información encontrada a nivel nacional se queda corta. Siendo esto un problema que se puede analizar desde varios ámbitos. La economía, el medio ambiente, el transporte de un país, entre otros, son factores que se relacionan estrechamente con el estado de la infraestructura vial de un país. Por ello es recomendable aumentar la inversión en investigación y apropiación de los avances internacionales, para poner en práctica estos avances en las vías nacionales.
- Las investigaciones nacionales más exhaustivas, afectarían de manera favorable los factores antes mencionados (economía, transporte medio ambiente, entre otros), ya que el total aprovechamiento de esta implementación (del GCR en las mezclas asfálticas) tendría como resultado, vías más durables, reduciendo gastos y bloqueos en las vías por mantenimiento, aumento de la velocidad en los vehículos (por una reducción de fallas en las vías, como baches, huellas, desgastes, etc.), mayor seguridad (mejor agarre de las llantas de los vehículos en el pavimento) y un aumento en la mitigación del impacto ambiental.

13 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C., “Por medio del cual se crea el Programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital y se adoptan otras disposiciones.”, DECRETO 442 DE 2015, Bogotá D.C.
- ANDES, U. D. (2005). SEGUNDA FASE DEL ESTUDIO DE LAS MEJORAS MECÁNICAS SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS.
- ANGULO, R.A, Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos Universidad distrital, 2005.
- Antunes M, Baptista F, Eusébio MI, Costa MS, Valverde Miranda C. Characterisation of asphalt rubber mixtures for pavement rehabilitation projects in Portugal. Asphalt Rubber 2000; 2000.

- ARRB Transport Research. The use of recycled crumb rubber. Austroads Pavement Research Group, aprg, Technical Note 10, 1999.
- Botero, J. H., Valentín, M. O., Suárez, O. M., Santos, J., Acosta, F. J., Cáceres, A. y Pando, M. A. Gomas Trituradas: Estado del Arte, Situación Actual y Posibles Usos como Materia Prima en Puerto Rico. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 5, No. 1, 69-86, 2005.
- Cano, J. O. and Charania, E. The Phoenix Experiences Using Asphalt-Rubber Proceedings. National Seminar on Asphalt-Rubber, Kansas City, Mo., 1989.
- Cao, R. and Bai, Q. Laboratory Evaluation of Performances of Asphalt Rubber and Gap Graded Mixtures. In: Plan, Build, And Manage Transportation Infrastructure In China, ASCE, 786-798, 2008.
- Carlson, D. D. and Zhu, H. Asphalt-Rubber - An Anchor to Crumb Rubber Markets. Third Joint UNCTAD/IRSG Workshop on Rubber and the Environment International Rubber Forum, Veracruz, Mexico, 1999.
- Carreño Zagarra Ricardo, Reyes Salcedo Jesús. ESTUDIO DEL EFECTO DE ADITIVOS REDUCTORES DE TEMPERATURAS DE TRABAJO, EN EL DESEMPEÑO DE MEZCLAS BITUMINOSAS GAP-GRADED ELABORADAS CON ASFALTOS MODIFICADOS CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO. Bogotá D.C., 2015.
- Choubane, B., Sholar, G. A., Musselman, J. A. and Page, G. C. A Ten-Year Performance Evaluation of Asphalt-Rubber Surface Mixes. Transportation Research Record, 1681, TRB, Washington, D.C., 10-18, 1999.
- Dasek O, Kudrna J, Kachtík J, Spies K. Asphalt rubber in Czech Republic. Munich: s.n. Asphalt rubber 2012; 2012.
- Dempster, D. Rubber Could Give the Road 100 Year Old Road Surface. European Rubber Journal, Vol. 160, No. 4, 47-48, 1978.
- Dong, Y. and Tan, Y. Mix Design and Performance of Crumb Rubber Modified Asphalt SMA. Geotechnical Special Publication No. 212, ASCE, 78-86, 2011.
- Epps, A. Design and analysis system for thermal cracking In asphalt concrete. Journal of Transportation Engineering, Vol. 126, No. 4, 300-307, 2000.
- Esch, D. C. Construction and Benefits of Rubber Modified Asphalt Pavements. Transportation Research Record. 860, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 5-13, 1982.

- F. Moreno, MC Rubio, MJ Martínez-Echevarría, El comportamiento mecánico de polvo de neumático por vía seca modificado mezclas bituminosas en caliente: La influencia del tiempo de digestión y el porcentaje de polvo de neumáticos, 2012, Volumen 26, Número 1 , páginas 466-474.
- Gallego J, Del Val MA, Tomas R. Spanish experience with asphalt pavements modified with tire rubber. Asphalt Rubber 2000; 2000.
- Heitzman, M. A. State of the Practice - Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier. Rep. No. FHWA-SA-92-022, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1992.
- Hicks G, Cheng D, Teesdale T, Assessment of Warm Mix technologies for use with Asphalt Rubber paving application. Tech-Report-103TM; 2010.
- Holleran, G. and Van, K. J. Asphalt Rubber Concrete Leads to Cost Effective Pavement Rehabilitation Reduced Thickness. Synopses for 1st Int. Conf. World of Pavement, Sydney, Australia, 2000.
- Huang, S.-C. Rubber Concentrations on Rheology of Aged Asphalt Binders. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 20, No. 3, 221-229, 2008.
- HUGO ALEXANDER RONDÓN QUINTANA, MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON GRANO DE CAUCHO DE LLANTA (Gcr): ESTADO DEL CONOCIMIENTO Y ANÁLISIS DE UTILIZACIÓN EN COLOMBIA, 2015.
- Hurley, G. C. and Prowell, B. Evaluation of Aspha-Min Zeolite for Use in Warm Mix Asphalt. NCAT Report 05-04, Auburn 2005.
- INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO, MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON ASFALTOS MODIFICADOS CON CAUCHO POR VÍA HÚMEDA, SECCIÓN 560-11, IDU, 2011.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, SUMINISTRO DE SEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO, ART 13, INVIAS.
- INSTITUTO PANAMERICANO DE CARRETERAS. Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE. Lexington : IPC, 1994. 89p.
- Jimenez, R. A. and Meier, W. R. Laboratory Evaluation of an Asphalt-Rubber SAL. Transportation Research Record, TRB, 1034, 86-96, 1985.
- JL Feiteira Dias , LG-Picado Santos , SD Capitão, Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on

the Portuguese road network, Volume 73, 30 December 2014, Pages 247–254.

- Khodary, M. H. F. Evaluation of Fatigue Resistance for Modified Asphalt Concrete Mixtures Based on Dissipated Energy Concept. Technische Universität Darmstadt, 2010.
- LA CORPORACIÓN ECOFUTURO. <http://ecofuturo.co/quienes-somos/>
- Lee, S. J., Amirkhanian, S. N., Putman, B. J. and Kim, K. W. Laboratory Study of the Effects of Compaction on the Volumetric and Rutting Properties of CRM Asphalt Mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, No. 12, 1079-1089, 2007.
- Lee, S.-J., Akisetty, C. K., and Amirkhanian, S. The Effect of Crumb Rubber Modifier on the Performance Properties of Rubberized Binders in HMA Pavements. Constr. Build. Mater., 22, 7, 1368-1376, 2008.
- Lee, S.-J., Amirkhanian, S. and Shatanawi, K. Effects of Crumb Rubber on Aging of Asphalt Binders. Proc., Asphalt Rubber 2006, Vol. 3, Palm Springs, Calif., 779–795, 2006.
- Loughheed, T. J. and Papagiannakis, A. T. Viscosity Characteristics of Rubber-Modified Asphalts. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 8, No.3, 153-156, 1996.
- Mavridou S, Oikonomou N, Kalofotias A. Worldwide survey on best (and worse) practices concerning rubberised asphalt mixtures implementation (number of different cases, extent of application. Thessaloniki: EU-LIFE+ Environment Policy and Governance. ROADTIRE, D2.1.1; 2010.
- McQuillen, J. L. and Hicks, R. G. Construction of Rubbermodified Asphalt Pavements. J. Constr. Eng. Manage., Vol. 113, No. 4, 537–553, 1987.
- McQuillen, J. L., Takallou, H. B., Hicks, R. G. and Esch, D. Economic Analysis of Rubber-Modified Asphalt Mixes. Journal of Transportation Engineering, Vol. 114, pp. 259-277, 1988.
- MURAT KARACASU, VOLKAN OKUR, AND ARZU ER, “A Study on the Rheological Properties of Recycled Rubber-Modified Asphalt Mixtures, “The Scientific World Journal, vol. 2015, Article ID 258586, 9 pages, 2015.
- Nordgren T, Tykesson A, dense graded asphalt rubber in cold climate conditions. Munich: s.n. Asphalt Rubber 2012; 2012.
- Nourelhuda M, Ali G. Asphalt-rubber pavement construction and performance: the sudan experience. Munich: s.n. Asphalt Rubber 2012; 2012.
- Oliver, J. W. H. Modification of Paving Asphalts by Digestion with Scrap Rubber. Transportation Research Record, TRB, 821, 37-44, 1981.

- Oliver, J. W. H. Optimizing the Improvements Obtained by the Digestion of Comminuted Scrap Rubbers in Paving Asphalts. *Electron. J. Assoc. Asph. Paving Technol.*, 51, 169-188, 1982.
- Othman, A. Fracture Resistance of Rubber-modified Asphaltic Mixtures Exposed to High-Temperature Cyclic Aging. *Journal of Elastomers and Plastics*, Vol. 38, 19-30, 2006.
- Pinto A, Sousa J, The first brazilian experience with in situ field blend rubber asphalt. Munich: s.n. *Asphalt Rubber 2012*; 2012.
- Punith, V.S., Suresha S. N., Sridhar Raju, Sunil Bose and Veeraragavan, A. Laboratory Investigation of Open-Graded Friction Course Mixtures Containing Polymers and Cellulose Fibers. *Journal of Transportation Engineering*, Accepted to publish, 2011.
- Putman, B. J. Qualification of the Effects of Crumb Rubber in CRM Binder. Ph.D. dissertation, Clemson Univ., 2005.
- Putman, B. J., Thompson, J. U. and Amirkhanian, S. N. High Temperature Properties of Crumb Rubber Modified Binders. *Proc., 4th Int. Conf. on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, iSMARTi*, 2005.
- Ramos Arizpe, Curso de Cemento: Combustibles Alternativos, Ediciones Holderbank 1997.
- Reed, J. Evaluation of the Effects of Aging on Asphalt Rubber Pavements. Thesis for the Degree Master of Science, Arizona State University, December 2010.
- Revista Tecno Lógicas [0123-7799] Rondón, Hugo Año:2012 iss:29 pág.:13 -31
- RICARDO ALBERTO ANGULO RODRÍGUEZ Y JOSÉ LUIS DUARTE AYALA; Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos. Bucaramanga; 2005.
- Rubber & Plastic News. Asphalt Rubber Passes the Test, Here to Stay, Rubber and Plastic News, The Rubber Industry's International Newspaper, Crain Publications, 1998a.
- Rubber & Plastic News. Road Work Ahead, Rubber and Plastic News, The Rubber Industry's International Newspaper, Crain Publications, 1998b.
- Santagata FA, Canestrari F, Pasquini E, Mechanical characterisation of asphalt rubber – wet process. Palermo: s.n. In: 4th International SIIV Congress; 2007.

- Scrap Tires Characteristics, Rubber manufactures association <http://www.creces.cl/>
- Sebaaly, P. E., Bazi, G., Weitzel, D., Coulson, M. A., and Bush, D. Long Term Performance of Crumb Rubber Mixtures in Nevada. In: Proc., Asphalt Rubber 2003 Conf., Brasilia, Brazil, 111–126, 2003.
- Shen, J., Amirkhanian, S. N. and Lee, S.-J. HP-GPC Characterization of Rejuvenated Aged CRM Binders. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, No. 6, June 1, 515-522, 2007.
- Sibal, A., Das, A. and Pandey, B. B. Flexural Fatigue Characteristics of Asphalt Concrete with Crumb Rubber. Int. J. of Pavement Engineering, Vol. I, No. 2, 119-132, 2000.
- Sousa, Jorge B, The Future of Rubberized Pavement: Reacted and Activated Rubber, Congreso interancional- Pavimentos de Hormigon y asfalto, Agosto 2016.
- Souza R. Experiences with use of reclaimed rubber in asphalt within Europe. Birmingham: s.n. Rubber in Roads; 2005.
Stroup-Gardiner, M., Newcomb, D. E. and Tanquist, B. Asphalt-rubber interactions. TRB Paper No. 930809, Transp. Res. Board, Washington, D.C., 1993.
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, SEGUNDA FASE DEL ESTUDIO DE LAS MEJORAS MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS DE LLANTAS- PISTA DE PRUEBA, CONTRATO IDU-306-003, BOGOTÁ D.C., 2005,.
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, SESTUDIO DE LAS MEJORAS MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS DE LLANTAS., CONTRATO IDU-366-01, BOGOTÁ D.C., 2002,.
- Velar, J. F. Characterization of Hot Mix Asphalt Using Crumb Rubber. MSc. Thesis, University of Puerto Rico at Mayagüez, Civil Engineering and Surveying Department, Mayagüez, Puerto Rico, 1997.
- VELÁZQUEZ, MANUEL, “Manual del Asfalto”, URMO, S.A DE EDICIONES, 1977.
- Wang, J. C. and Zeng, X. Influence of Temperature and Pressure on the Dynamic Properties of Rubber-Modified Asphalt Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, No. 1, 125-131, 2006.
- Waste Ideal MAGAZINE, 2007
- Way, G.B. Flagstaff I-40 Asphalt Rubber Overlay Project, Nine Years of Success Arizona Department of Transportation. Paper Presented to the Transportation Research Board, 78th Annual Meeting, August 1999.

- Way, George, Construction, Testing and Evaluation of HMA Materials:Sustainability, Recycling, Rubberized Asphalt, Congreso interancional- Pavimentos de Hormigon y asfalto, Agosto 2016.
- Widyatmoko I, Elliot R. A review of the use of crumb rubber modified asphalt worldwide. UK : Waste & Resources Action Programme (WRAP); 2007.
- Xiao, F. and Amirkhanian, S. N. HP-GPC Approach to Evaluating Laboratory Prepared Long-Term Aged Rubberized Asphalt Binders. In: GeoHunan International Conference 2009, Geotechnical Special Publication No. 191, 42-48, 2009.
- Zhaoxing Xie, Junan Shen, Performance properties of rubberized stone matrix asphalt mixtures produced through different processes, Volume 104, 1 February 2016, Pages 230–234.

APENDICE 1: MAQUINARIA IMPLEMENTADA PARA LA OBTENCION DEL GCR.

El caucho se caracteriza por ser una sustancia elástica, con alta resistencia eléctrica, ya sea natural o sintético, este último proviene de a partir de la preparación de los hidrocarburos saturados.

Este material es fabricado para diferentes usos, uno de los más importantes es para la fabricación de neumáticos (llantas), ya que estos presentan grandes propiedades como la elasticidad, alta resistencia eléctrica y son grandes aislantes de agua y temperatura.

Como bien se ha venido mencionando en esta investigación, los neumáticos son desechados de manera inadecuada, ya sea porque son quemados a cielo abierto lo cual causa grandes impactos negativos en el medio ambiente debido a que su combustión genera gran emisión de contaminantes que son sumamente nocivos para la salud humana, estos contaminantes pueden ser partículas de monóxido de carbono (CO). Los neumáticos también son utilizados como basureros en donde puede producirse el almacenamiento de aguas contaminadas produciendo de esta manera todo tipo de insectos que llevan grandes enfermedades como lo son actualmente el zika, el dengue entre otros.

Es por esta razón que se deben tomar medidas que ayuden a resolver estos problemas, de este modo se emplea una maquinaria para la trituración de los neumáticos y la disminución de su tamaño para garantizar la calidad del material y así poder brindar las diferentes ventajas que este ofrece en las mejoras de las mezclas asfálticas.

Mediante el equipo que sea utilizado se obtienen diferentes productos del reciclado, esta clasificación se determina mediante el tamaño de los neumáticos y por el acero que es obtenido después de que es separado del caucho. Esta clasificación se puede observar mediante la **Ilustración 5**.



Ilustración 5: Diferentes características de la trituración del grano de caucho.
<http://trituratoradellantas.blogspot.com.co/>

Las características de estos materiales y los usos que presentan en el mercado son:

”Combustible Derivado de Llantas (TDF): Este es uno de los subproductos de mayor desarrollo en el mercado de desechos transformados del reciclaje de las llantas. Es considerado como la fuente de energía más limpia, con un poder 12.

Derivado de llantas combustible (TDF) es un combustible derivado de llantas de desecho de todo tipo. TDF es el mercado más antiguo y desarrollado de las llantas de desecho en EE.UU. La trituración de neumáticos de desecho para producir TDF utiliza tecnologías de procesamiento del material en donde se incluye la trituración y la eliminación de contaminantes que afecten la calidad del producto.

Derivado General de Neumáticos Reciclados (TDA): Este subproducto posee características físicas que lo hacen muy adecuado para aplicaciones en el área de la ingeniería civil. Tiene propiedades de amortiguación que pueden ser utilizados en proyectos de carreteras y de ferrocarril ligeros para disminuir y minimizar vibraciones del tránsito. Ejemplo de ellos son las camas de las calles, así como los terraplenes de carreteras. Dispone, asimismo, de excelentes propiedades para el drenaje de los sistemas sépticos y los lixiviados en rellenos sanitarios. Para preparar el TDA, los neumáticos son alimentados por una trituradora primaria que corta los neumáticos utilizando cuchillas que giran a baja velocidad.

Mantillo (Mulch), Zonas de Juego (Playground), Césped de Campo (Field Turf), Productos Moldeados (Molded Products), Asfalto (Asphalt): La goma molida es un subproducto conocido como “Miga de Goma” el cual no contiene acero en su composición. Este se puede incorporar en alfombrillas, relleno de alfombras, guardabarros de vehículos, adhesivos, cubiertas de las zonas de juego, decoración de los paisajes, escenarios deportivos y productos moldeados, en función de los tamaños producidos.”

El proceso que se realiza para la obtención del grano de caucho es el siguiente:



Figura 8: Proceso para la Trituración de Neumáticos.

<http://ecofuturo.co/plantas/trituracion-mecanica-de-neumaticos-descartados/>

En el mercado existen varias plantas que se especializan en el reciclaje de las llantas, algunas de estas tienen diferentes diseños para adaptarse a los requerimientos que se le va dar al grano de caucho, en donde debe primar la calidad del material.

En Colombia existen plantas trituradoras de llantas como Gercons Colombia la cual cuenta con los siguientes equipos para llevar a cabo este proceso:

Cortadora de Llantas:



Figura 9: Cortadora de Llantas.

<http://www.gerconscolombia.com/index.php/13-roksprocket-mosaic/21-cortadora-llantas.html>

Esta máquina cuenta con una plataforma giratoria para que sea mucho más fácil y eficiente el proceso, cuenta con gran tecnología en el sistema hidráulico para que se produzca poco ruido, esta corta en aproximadamente 6 partes la llanta, es de alta presión y gran estabilidad. Esta cuenta con una capacidad de 80 llantas/hora. El motor tiene una capacidad de 5,5 Kw (Kilovatios, potencia eléctrica) y su peso es de 2500 kgs.

Trituradora de Llantas:

Se compone principalmente de tolva para los dos ejes, la cámara de trituración contiene 20 cuchillas que trabajan a baja velocidad, también cuentan con una criba de forma circular para la filtración del material, está conformada de acero y tiene una capacidad de 1 tonelada/hora.



Figura 10: Trituradora de Llantas.

<http://www.gerconscolombia.com/index.php/13-roksprocket-mosaic/20-trituradora-llantas.html>

Tolva: dispositivo que es similar a un embudo de gran tamaño que sirve para la disposición y canalización de materiales granulares.

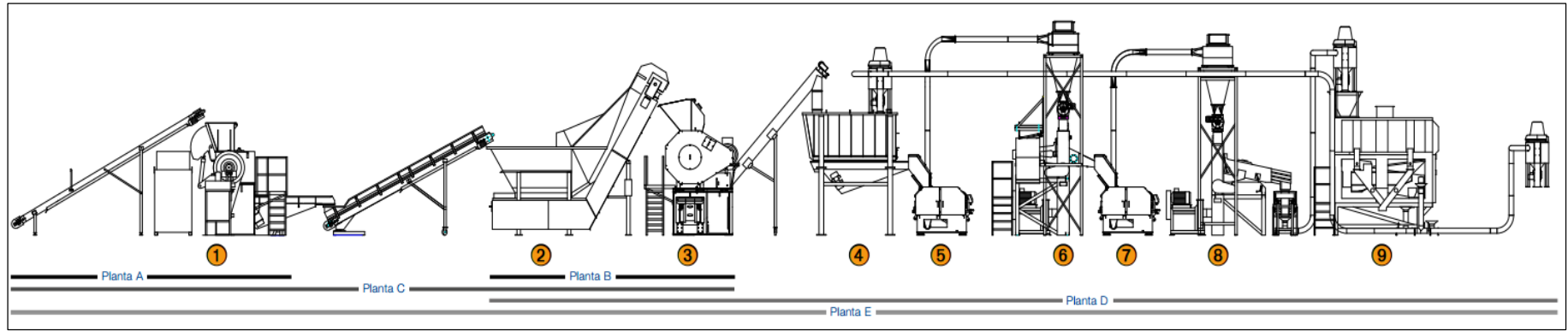
Destalonadora de Llantas:

Encargada principalmente de la separación del acero del talón de los neumáticos.

“Compuesto por un sistema hidráulico acompañado de bomba de pistones y complementado por acumulador conectado al gato hidráulico que permite extraer mediante un gancho los dos anillos de acero que están ubicados en los aros y punta del talón de las llantas. Esto reduce significativamente la cantidad de acero antes de proceder al corte y evitar el deterioro anticipado de las herramientas de disco del triturador”¹.

Algunas plantas utilizan diferentes procesos, como lo es en Eldan recycking, una empresa ubicada en Zaragoza, España dedicada al reciclaje de los neumáticos y al aprovechamiento del producto de este material, como se podrá observar en el siguiente gráfico:

¹ <http://www.gerconscolombia.com/index.php/13-roksprocket-mosaic/22-destalonadora-llantas.html>. Bogotá, Colombia. Diseñado por Dpto de Diseño y Publicidad Gercons Colombia.



Fuente: http://www.recyclingequipos.com/docs/FwXnM_Reciclaje%20de%20Neum%C3%A1ticos.pdf

1. Cortadora Súper Chopper:

Capaz de procesar una llanta de camión y te autos enteros. Cuenta con un pre triturador que funciona a baja velocidad con uno o más rotores.

2. Alimentador TBF:

Es el encargado de asegurar el que sea continuo el flujo del material hacia el molino.

3. Molino Rasper MPR:

Tiene una velocidad media en la rotación, contiene dos motores. Este molino es diseñado específicamente para el reciclaje de neumáticos.

4. SILO V4:

Es el que se encarga de garantizar el flujo continuo del material hacia la granuladora 1 y mejorar así su capacidad.

5. GRANULADORA 1:

Cuenta con un rotor de alta velocidad que se utiliza para la primera etapa de la granulación. Esta máquina es la que permite la liberación de hasta el 50% del textil de los neumáticos.

6. CLASIFICADOR PC10:

Separa el textil que es liberado.

7. GRANULADOR 2:

Rotor de alta velocidad para las etapas finales de granulación. El acero y el textil sobrantes, en el caso de que existan es en este lugar donde se liberan, el acero es extraído mediante la utilización de imanes.

8. CLASIFICADOR PC15:

Este se encarga de extraer el 40% del textil.

9. ASPIRADOR:

Se encarga de asegurar la distribución final de los gránulos y también extrae el textil restante para proporcionar un producto de alta calidad con una pureza de 99.9%.

Plantas de Asfalto y Trituración de Llantas

En Colombia existen plantas trituradoras de llantas como Grupo Gercons Colombia en Suba e Incoasfaltos, en Mosquera (Cundinamarca).

Grupo Gercons Colombia:

Esta es una empresa que se especializa en la fabricación y comercialización de productos que estén comprometidos con el medio ambiente, se encuentra ubicada en la 132D No. 160-47 Suba Bogotá DC. Cuenta con plantas completas o con máquinas por separado que se encargan del procesamiento de neumáticos que se encuentran fuera de uso.

También suministran fases de troceado trituración para producir chips de TDF, granulación hasta 1-4mm y, finalmente, planta para la obtención de polvo de caucho. En esta empresa han desarrollado sistemas que limpian el acero y de esa manera consiguen un acero libre de caucho de hasta un 99%.

- Reciclaje Llantas plantas completas:

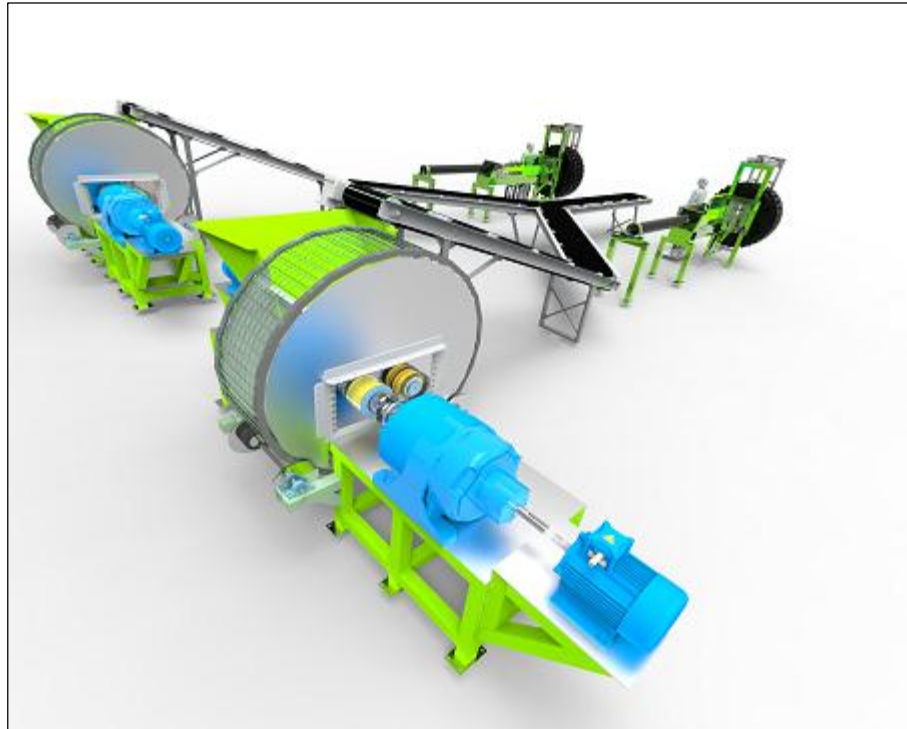


Figura 11: Sistema de reciclaje de llantas primera fase.
Gercons Colombia. 2016.

Este sistema cuenta con capacidad e 64 toneladas/día, dos trituradoas, dos destalonadoras, una cortadora, 3 cintas transportadoras y el tamaño que obtiene el grano de caucho en la salida es de 40x40mm, los costos de mantenimiento se reducen al 65% en comparación con otros sistemas de reciclaje.

IncoAsfaltos:

Es una empresa que se dedica al diseño, producción, ampliación, comercialización y transporte de materiales asfálticos. Cuenta con certificados de calidad de fichas técnicas sobre el GCR. En la **Tabla 4** se relaciona la ficha técnica que esta empresa utiliza para el control de calidad de las mezclas asfálticas con GCR que ellos producen.

Tabla 4: Especificaciones para el control de calidad.
IncoAsfaltos. 2016

| ENSAYO / ANALISIS | UNIDAD | NORMA DE ENSAYO INV | ESPECIFICACIÓN | | RESULTADO | FRECUENCIA | |
|--|--------|---------------------|----------------|------|-----------|------------|--------|
| ASFALTO ORIGINAL Penetración (25 °C, 100g, 5s) Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola Viscosidad Brookfield a 163°C Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland | 0.1 mm | E-706 | Min | Máx | 60.0 | CADA LOTE | |
| | °C | E-712 | 40.0 | 70.0 | | | |
| | cP | E-717 | 52.00 | - | | | 81.0 |
| | °C | E-709 | 1500 | 3000 | | | 2700.0 |
| | | | 230.00 | - | | | 297.0 |
| PERDIDA DE MASA EN EL HORNO DE LÁMINA ASFÁLTICA DELGADA EN MOVIMIENTO (INV E-720) Y ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO | | | | | | | |
| Pérdida de masa | % | E-720 | - | 1.0 | 0.3528 | MENSUAL | |
| Penetración del residuo luego de la perdida por calentamiento en película delgada en movimiento, (%) de la penetración original | % | E-706 | 65.00 | - | 75.0 | MENSUAL | |
| Recuperacion Elástica Por Ductilidad | % | E-702 | 50.0 | - | 56.00 | MENSUAL | |
| NOTA: Temperatura recomendada de mezclado: 173 - 177°C Temperatura recomendada de compactación: 150 - 155°C | | | | | | | |

APENDICE 2: EXPERIENCIAS COLOMBIANAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS CON GCR.

En los procesos constructivos utilizados para la construcción de pavimentos con presencia de GCR, se describe el paso a paso de la construcción de unos tramos de prueba realizados por el IDU, con el Contrato IDU-306-003 cuyo objeto es, “SEGUNDA FASE DEL ESTUDIO DE LAS MEJORAS MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS DE LLANTAS – PISTA DE PRUEBA”.

En estos tramos de prueba se implementó un proceso constructivo similar al de la construcción de un pavimento convencional.

Actividades Preliminares.

Además de las actividades que se relacionan a continuación, es necesario otras actividades preliminares para la realización de cualquier obra de infraestructura (estas actividades que se relacionan también aplican para otro tipo de obras).

Para cualquier tipo de obra que tenga que ver con una modificación al espacio público o el tránsito y la movilidad, es necesario realizar un plan de manejo de tráfico para regular esa ocupación de estos espacios necesarios para el perfecto fluir del tráfico peatonal y vehicular.

A además se debe realizar programas sociales y ambientales. Estos programas ambientales consisten en realizar actas de vecindad, para dar constancia del estado actual de las obras vecinas para evitar discrepancias en las intervenciones del terreno ya que este tipo de intervenciones influyen en las obras vecinas a estas obras.

Adicionando a este par de actividades se debe realizar un acta donde se dé inicio a la obra y a todas sus actividades que son requisito clave para el buen desarrollo del proyecto.

Fresado.

Para las pistas de prueba se hizo el correspondiente fresado de la estructura de pavimento existente donde se cortó 170 mm del pavimento existente, donde se mezcló 100 mm de material fresado con la base existente y el material restante se

botó. Esto con el fin de mantener las cotas iniciales de la rasante de la estructura anterior.



Ilustración 6: Proceso de fresado en los tramos de prueba.
Fuente: IDU-ANDES.

Extensión, seriado y compactación.

El espesor de la capa de la base granular mejorada con el material reciclado fue de 10 cm, donde fue compactada con el 95% de la densidad optima que fue de 1.93 ton/m³ (éste porcentaje obtenido de la humedad fue medido con un densímetro nuclear), con un contenido de humedad de 7.2%. Para esta actividad se utilizó un compactador de rodillo liso vibratorio.

Para la base de la estructura de pavimento se utilizó material reciclado del pavimento anterior.



Ilustración 7: Proceso de Extensión, seriado y compactación.
Fuente: IDU-ANDES.

Medición de deflexiones antes de la colocación de las mezclas asfálticas.

Al realizar la inspección de la estructura anterior del pavimento, existen una serie de deflexiones en ciertos lugares de la estructura.

Además de estos puntos mencionados se midieron con Viga Benkelman, deflexiones a cada 5 metros a lo largo de las huellas de los vehículos.

En estos lugares mencionados se realizó la medición de las deflexiones para tener un dato inicial para el seguimiento de estos tramos.



Ilustración 8: Medición de Deflexiones.
Fuente: IDU-ANDES.

Colocación de mezcla convencional.

Se dividió los tramos de estudio en 54 metros lineales cada uno, es decir, cada 54 metros lineales se cambiará el elemento modificador del pavimento. El espesor para las capas de asfalto se estipuló de 7 cm.

En los 54 metros lineales de mezcla convencional, se proporcionó un asfalto de barranca 80-100 (Según el Instituto Nacional de Vías, este está en el rango estipulado para pavimentación en Colombia).

En la construcción de este tramo utilizaron una finisher de 3.5 metros de ancho, con una capacidad de 5 km/h para colocar la mezcla. A demás se utilizaron dos compactadores, un vibrocompactador de rodillo liso que fue utilizado también como compactador estático y otro compactador de llantas para generar el acabado final. Se aplicaron tres pasadas de cada compactador.



Ilustración 9: Colocación de la mezcla convencional.
Fuente: IDU-ANDES.

La temperatura de llegada de la mezcla fue de 144°C y la temperatura de compactación fue de 135°C.

Colocación de mezcla asfáltica proceso vía seca y vía húmeda.

Para la mezcla modificada por vía seca se utilizó un tratamiento especial en la compactación, debido a la elasticidad del GCR, según la literatura, produce un efecto de recuperación que contrarresta el grado de compactación obtenido a medida que la temperatura de la mezcla disminuye. Debido a esto se recomienda mantener el proceso de compactación hasta que la mezcla alcance una temperatura de 60 °C.

La temperatura de llegada de la mezcla (Vía Seca) fue de 160°C y la temperatura de compactación fue de 155°C.

La temperatura de llegada de la mezcla (Vía Húmeda) fue de 168°C y la temperatura de compactación fue de 162°C.

APENDICE 3: GLOSARIO

- **Aceites aromáticos:** prolongan la vida del asfalto-caucho.
- **Aminas:** estas evitan el endurecimiento progresivo del caucho, el aumento de la fragilidad y la pérdida de la elasticidad.
- **Antioxidantes:** retardan el deterioro del caucho causado por la oxidación.
- **Cemento Asfáltico Modificado con Grano de Caucho Reciclado:** es un ligante hidrocarbonado resultante de la mezcla de cemento asfáltico, grano de caucho reciclado (GCR) y, eventualmente, otros aditivos que se requieran para utilizar el ligante en trabajos de pavimentación. El grano de caucho reciclado (GCR) corresponde a partículas de caucho obtenidas del reciclaje de llantas (Vulcanizado).
- **Granulometría Abierta:** Esta granulometría corresponde a un material con una cantidad elevada de vacíos luego de la compactación.
- **Granulometría Cerrada:** Esta granulometría corresponde a un material con una baja cantidad de vacíos después de la compactación.
- **Granulometría Continua:** En esta granulometría, se encuentra variedad de tamaños, en proporciones que genera una granulometría con una curva uniforme.
- **Granulometría Densa:** Granulometría Cerrada.
- **Granulometría Discontinua:** presencia de saltos en la curva granulométrica por la ausencia de algunos tamaños de partículas de los materiales.
- **Granulometría Uniforme:** se caracterizan por ser utilizados en construcción de tratamientos superficiales.
- **Negro de Humo:** este componente contribuye a disminuir el desgaste de las llantas con el contacto con la superficie. Además refuerza el ligante y ayuda a disminuir el envejecimiento.
- **Propiedades Reológicas:** estas propiedades son las encargadas de estudiar el comportamiento de los fluidos sometidos a cargas mecánicas. La estructura sólida, al tener forma definida, cuando se somete a carga, se deforma y se tensiona. Sin embargo la estructura líquida, al no tener forma definida, cuando se somete a carga no se deforma si no que al cambio producido en la posición de los átomos se le llama fluencia y tampoco se produce tensión ya que esta se libera con fluencia.

- **Tricloroetileno:** Se usa principalmente como solvente para eliminar grasa de partes metálicas, aunque también es un ingrediente en adhesivos, líquidos decapantes de pintura, para corregir escritura a máquina y quitamanchas. El TCE es una sustancia sintética que no se produce de forma natural en el medio ambiente. Sin embargo, se ha encontrado en fuentes de aguas subterráneas y aguas superficiales como residuo acumulado de la actividad humana de su manufactura, uso y disposición.